

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР В ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ДИНАМИЧЕСКУЮ СПЕКТРАЛЬНУЮ ФИЛЬТРАЦИЮ

Л.Ф. КУПЧЕНКО, Н.В. СЛАБУНОВА, О.А. ГУРИН

Рассмотрены математические и физические аспекты динамической согласованной спектральной фильтрации оптического излучения с использованием акустооптического взаимодействия. Показано, что математической основой операции согласованной спектральной фильтрации, обеспечивающей повышение контрастности изображений, служит операция вычисления скалярного произведения вектора аппаратной функции (вектора фильтра) на вектор входного сигнала, а физической реализацией является дифракция полихроматического оптического излучения на многочастотной, управляемой по амплитуде ультразвуковой волне. Можно ожидать, что такой подход позволит установить связь между характеристиками акустического процессора, и требованиями, предъявляемыми в этом случае к условиям многочастотного акустооптического взаимодействия.

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

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена аппаратной реализации акустооптического процессора в оптико-электронной системе, основанной на принципах динамической спектральной фильтрации. Метод динамической спектральной фильтрации представляет собой согласованную фильтрацию в оптическом диапазоне и состоит в том, что на основе априорной информации о спектральных характеристиках излучения объекта и помехи (фона) обеспечивается селекция полезного сигнала при наличии сигнала помехи в интересах повышения контраста изображения.

Это достигается за счет использования управляемых фильтров, обеспечивающих такой спектральный коэффициент пропускания, который является «максимальным» для потока излучения объекта и «минимальным» для оптического сигнала помехи. В качестве устройств, обеспечивающих управляемый коэффициент пропускания, используются акустооптические светофильтры с неколлинеарной геометрией взаимодействия света и звука, в которых дифракция света происходит на многочастотном ультразвуке, а управление коэффициентом пропускания обеспечивается путем изменения амплитуды звуковой волны [1].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В интересах определения характеристик оптико-электронной системы с динамической спектральной фильтрацией оказалось целесообразным акустооптический светофильтр с управляемым коэффициентом пропускания рассматривать как оптический процессор, в котором повышение контрастности изображений реализуется как математическая операция вычисления «скалярного произведения вектора на вектор». При этом физической реализацией этой операции является дифракция полихроматического оптического

излучения на многочастотной, управляемой по амплитуде, ультразвуковой волне.

Целью статьи является установление связи между характеристиками акустооптического процессора, обеспечивающего операцию повышения контрастности изображения, и физическим параметрам многочастотного акустооптического взаимодействия.

2. ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Переходя к обсуждению основных положений статьи, рассмотрим акустооптический светофильтр как процессор, обеспечивающий повышение спектрального контраста, путем уменьшения коэффициента пропускания светофильтра для спектральных составляющих фона – В с минимальным уменьшением коэффициента пропускания для спектральных составляющих объекта – Т

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

Процесс спектральной фильтрации оптического излучения исследуется обычно с использованием векторного представления сигналов (рис 1).

Оптическое излучение, представляется 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. Для этого случая вектор фильтра вычисляется на основании априорных сведений о спектральных характеристиках вектора объекта \vec{T} и вектора фона \vec{B} на основании следующего выражения

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

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

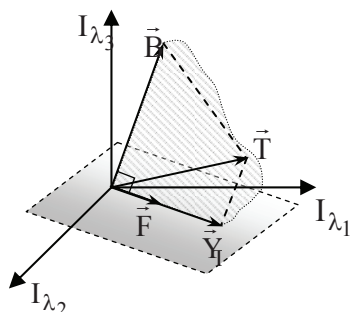


Рис. 1. Иллюстрация к спектральной фильтрации

На рис.1 в трехмерном пространстве изображено расположение векторов при спектральной фильтрации акустооптическим процессором, причем величина проекций каждого из векторов отображает величину интенсивности излучения для определенной длины волны. Показано, что вектор фильтра $\vec{F} = f_1\vec{\lambda}_1 + f_2\vec{\lambda}_2 + f_3\vec{\lambda}_3$ и вектор фона $\vec{B} = b_1\vec{\lambda}_1 + b_2\vec{\lambda}_2 + b_3\vec{\lambda}_3$ ортогональны, а вектор, иллюстрирующий спектральные свойства объекта $\vec{T} = t_1\vec{\lambda}_1 + t_2\vec{\lambda}_2 + t_3\vec{\lambda}_3$, занимает произвольное положение.

В алгебраической форме скалярное произведение представляет собой операцию попарного произведения проекций векторов, участвующих в процессе селекции с последующим их суммированием. При вычислении скалярного произведения вектор фона и вектор фильтра ортогональны и, следовательно, результат умножения равен нулю

$$(\vec{B} \cdot \vec{F}) = b_1f_1 + b_2f_2 + b_3f_3 = 0, \quad (3)$$

что свидетельствует об отсутствии в выходном сигнале акустооптического процессора спектральных составляющих фона, а скалярное произведение вектора объекта и фильтра отличны от нуля

$$(\vec{T} \cdot \vec{F}) = t_1f_1 + t_2f_2 + t_3f_3 \neq 0 \quad (4)$$

и характеризуют величину сигнала на выходе акустооптического процессора.

Таким образом, акустооптический процессор производит вычисление скалярного произведения вектора на вектор, представляющего собой попарное умножение проекций соответствующих спектральных компонент с последующим их сложением.

В оптических процессорах операция умножения реализуется с использованием оптических элементов

с управляемой прозрачностью. В акустооптике понятие «управляемая прозрачность» связано с дифракционной эффективностью акустооптического взаимодействия, которая представляет собой отношение квадратов амплитуды дифракционной составляющей E_1 к амплитуде падающего излучения A .

В режиме брэгговской дифракции, когда свет падает на фронт ультразвуковой волны под углом Брэгга

$$\sin \theta_B = \frac{k_0}{2k} \quad (5)$$

и обеспечивается объемное взаимодействие света с ультразвуком, т. е. когда параметр Клейна-Кука

$$Q = \frac{k_0^2 l}{k} \gg 1, \quad (6)$$

где k и k_0 – волновые числа света и звука, l – длина акустооптического взаимодействия, то дифракционная эффективность представляется в следующем виде [2]:

$$\eta = \left| \frac{E_1}{A} \right|^2 = \frac{1}{1 + \gamma_1^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma_1^2} \right), \quad (7)$$

где $\eta = \varepsilon/q$ – отношение параметра расстройки

$\varepsilon = 1 + \frac{2k \sin \theta}{k_0}$ к параметру Рытова $q = \left(\frac{\Delta n}{n} \right) \cdot \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$;

$\frac{\Delta n}{n}$ – относительное изменения показателя преломления среды вызванное ультразвуком.

Управление величиной дифракционной эффективности, а следовательно и реализация операции умножения достигается путём изменения амплитуды звуковой волны, связанной с величиной постепенного изменения коэффициента преломления соотношением [3]

$$\frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\frac{M_2 P_{ак}}{lb}},$$

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

В оптических процессорах математическая операция сложения осуществляется путем пространственного суммирования нескольких световых лучей.

В акустооптическом процессоре полихроматическое световое излучение взаимодействует с многократным ультразвуковым полем. Следовательно, дифрагировать на ультразвуковой сложной пространственной решетке будут те спектральные компоненты, для которых выполняется условие брэгговского синхронизма [4].

Эти утверждения вытекают из преобразованного выражения (5)

$$\lambda \cdot f_0 = 2v_0 \sin \theta_B = \text{const}, \quad (8)$$

где f_0 и v_0 – частота и скорость ультразвука; λ – длина световой волны в среде.

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

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{k_2 + k_0}{k_1} \approx \frac{\lambda \cdot f_0}{v_0} \quad (9)$$

Из соотношения следует, что световые компоненты с различными длинами волн при выполнении условий брэгговского синхронизма $\lambda \cdot f_0 = \text{const}$ на границе звукового поля складываются в единый световой пучок, обеспечивая тем самым операцию сложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен последовательный анализ динамического спектрального фильтра как акустооптического процессора, а затем как спектрометра с переменным коэффициентом пропускания по спектру. Это позволяет установить связь между характеристиками акустооптического процессора, и параметрам много-частотного акустооптического взаимодействия. В качестве характеристик акустооптического процессора может выступать, например контраст изображения на выходе процессора.

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] В.И.Балакшиев, В.Н.Парыгин, Л.Е.Чирков. Физические основы акустооптики.-М.: Радио и связь. 1985. – 285 с.
- [4] Купченко Л. Ф. Экспериментальні дослідження процесу динамічної спектральної фільтрації з використанням взаємодії лазерного випромінювання з багаточастотною акустичною хвилею / Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк, О.О.Гурін, В.Ю.Вдовенков // Прикладная радиоэлектроника. – 2016, № 15 – С. 100 – 104 .

Поступила в редакцию 25.10.2016



Купченко Леонид Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: акустооптика, акусто-электроника, изображающая спектроскопия, оптико-электронные системы.



Слабунова Наталия Вадимовна, преподаватель кафедры физики и радиоэлектроники, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: акустооптика, акустоэлектроника, изображающая спектроскопия, оптико-электронные системы.



Гурин Олег Александрович, адъюнкт, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: акустооптика, акустоэлектроника, изображающая спектроскопия, оптико-электронные системы.

УДК 681.78

Акустооптичний процесор в оптоелектронній системі, що забезпечує динамічну спектральну фільтрацію/Л.Ф.Купченко, Н.В. Слабунова, О.О. Гурін //Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2016. – Том 15, № 4. – С. 359 – 361.

Розглянуто математичні і фізичні аспекти динамічної узгодженої спектральної фільтрації оптичного випромінювання з використанням акустооптичної взаємодії. Показано, що математичною основою операції узгодженої спектральної фільтрації, що забезпечує підвищення контрастності зображень, виступає операція обчислення скалярного добутка вектора апаратної функції (вектора фільтра) на вектор вхідного сигналу, а фізичною реалізацією є дифракція поліхроматичного оптичного випромінювання на багаточастотній, керованій за амплітудою ультразвукової хвилі. Можна очікувати, що такий підхід дозволить встановити зв'язок між характеристиками акустичного процесора, і вимогами, що висуваються в цьому випадку до умов багаточастотної акустооптичної взаємодії.

Ключові слова: динамічна спектральна фільтрація, брегівська дифракція поліхроматичного лазерного випромінювання на багаточастотному ультразвуку.

Іл.: 01. Бібліогр.:04 найм.

UDC 681.78

Acoustooptic processor providing dynamic spectral filtering in the optoelectronic system / L.F Kupchenko, N.V. Slabunova, O.A Goorin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 359 – 361.

The mathematical and physical aspects of dynamic coherent spectral filtering of optical radiation with use of acoustooptic interaction are considered. It is shown that the mathematical basis of a coherent spectral filtering for contrast increase of images is the operation of calculating the scalar product of the vector of the instrumental function (filter vector) by the vector of an input signal. The physical implementation of the coherent spectral filtering is a diffraction of polychromatic optical radiation which is provided by multi-frequency amplitude controlled ultrasonic wave. It can be expected that such an approach will enable to establish a relationship between the characteristics of the acoustic processor, and requirements to the conditions of multifrequency acoustooptic interaction.

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

Fig.:01. Ref.: 04items.