

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО И РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ

Приводятся результаты исследований характеристик акустооптических спектроанализаторов излучения оптического и радиотехнических диапазонов, основанных на использовании брэгговских резонансов первого и второго порядков. Показано, что характеристики акустооптических устройств, использующих первый и второй порядки дифракции, различным образом зависят от параметров акустооптического взаимодействия, так как в основе селекции оптических и радиотехнических сигналов лежат различные принципы акустооптического взаимодействия.

Ключевые слова: акустооптика, спектральный анализ оптических и радиотехнических сигналов

1. Введение

В работах, посвященных использованию акустооптических устройств в радиоастрономии, показано, что с использованием современных методов частотного преобразования сверхвысокочастотных сигналов и нового класса акустооптических устройств удается решить комплекс радиоастрономических задач [1]. Акустооптические процессоры обработки радиосигналов способны осуществлять спектральный анализ в полосе частот 2 ГГц с разрешающей способностью 50 кГц. В работе [2] показано, что успехи в технологии изготовления многоканальных акустооптических ячеек позволяют получить мгновенную частоту обзора спектроанализаторов $10 \div 20$ ГГц. В астрономии акустооптические спектроанализаторы используются не только для анализа радиотехнических сигналов, но и для исследования спектрального состава оптического излучения [3].

Исследователей, занимающихся созданием оптоэлектронных систем на основе акустооптического взаимодействия, привлекает относительная простота формирования аппаратной функции акустооптических устройств. Изменяя условия взаимодействия световых и ультразвуковых волн – угол взаимодействия между световой и ультразвуковой волнами, амплитуду и частоту ультразвуковых волн, а также осуществляя выбор сред с различными анизотропными свойствами, возможно в широких пределах изменять характеристики акустооптических устройств.

Предметом настоящей статьи является исследование характеристик акустооптических устройств, предназначенных для анализа спектрального состава радиотехнических сигналов либо фильтрации оптического излучения на основе брэгговских резонансов высших порядков дифракции, когда взаимодействие света и звука осуществляется под углами, кратными углу Брэгга.

2. Постановка задачи

Обычно в акустооптических устройствах, предназначенных для анализа спектрального состава излучения оптического или радиотехнического диапазона, используется наиболее эффективный режим акустооптического взаимодействия – режим брэгговской дифракции, когда взаимодействие света и ультразвука происходит под углом Брэгга, $\sin \theta_B = -k_0/2k$ (где k_0 и k – волновые числа ультразвука и света соответственно). В ряде работ [4, 5], в том числе выполненных при участии авторов настоящей статьи, исследованы брэгговские резонансы высших порядков, которые наблюдаются при взаимодействии световой и ультразвуковых волн под углами, кратными углу Брэгга. В этом случае свойства составляющих высших порядков дифракции отличаются от свойств составляющих первых порядков. Так, дифракционные составляющие второго порядка обладают в два раза большей, а третьего – в три раза большей угловой дисперсией, чем составляющие первого порядка. Появление дифракционных составляющих высших порядков обусловлено многократ-

ным рассеянием света на объемных периодических структурах, создаваемых ультразвуковой волной, и, следовательно, эти составляющие обладают большей угловой и спектральной селективностями. Показано, что значение дифракционной эффективности зависит не только от относительного изменения коэффициента преломления $\Delta n/n_0$, которое обусловлено наличием в среде ультразвуковой волны, но и от частоты ультразвука [5]. Это означает, что свойства составляющих высших порядков дифракции будут определять характеристики построенных на их основе акустооптических устройств.

Существенно, что в основе селекции оптических и радиотехнических сигналов лежат различные принципы акустооптического взаимодействия. Физической основой спектроанализаторов радиотехнического диапазона является дисперсия световой волны на ультразвуковой волне, при использовании которой с изменением частоты ультразвуковой волны меняется угловое положение дифрагированной волны в пространстве. Если длина световой волны фиксирована, то по углу отклонения дифрагированной световой волны можно определить длину акустической волны, возбуждаемой радиосигналом в звукопроводе, а при известной скорости ее распространения – и соответствующую частоту сигнала.

Многоканальная фильтрация оптического излучения основана на селективных свойствах акустооптического брэгговского взаимодействия и состоит в том, что угол падения светового излучения на ультразвук выбирается таким, чтобы выполнялось условие брэгговского синхронизма для средних значений длины волны света λ_{cp} и частоты ультразвука f_{0cp} . Далее перестройка спектральной избирательности акустооптического фильтра осуществляется за счет изменения частоты ультразвукового колебания f_0 при постоянном угле акустооптического взаимодействия.

Следовательно, характеристики селектирующих акустооптических устройств, обеспечивающих спектральный анализ оптических или радиотехнических сигналов, будут различны. В настоящей работе, по-видимому, впервые рассматриваются свойства акустооптических анализаторов спектрального состава излучения оптического и радиотехнических диапазонов с использованием брэгговских резонансов первого и второго порядков.

Цель работы – определить характеристики акустооптических анализаторов спектрального состава излучения оптического и радиотехнических диапазонов при выполнении условий брэгговских резонансов первого и второго порядков и произвести их сравнительный анализ.

3. Основные соотношения

Ограничимся сравнительным анализом свойств акустооптических анализаторов спектрального состава излучения оптического и радиотехнических диапазонов для брэгговских резонансов первого и второго порядков. Соотношения для дифракционной эффективности первого и второго порядков приводятся в работе [5] и имеют следующий вид:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \gamma_1^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n_0} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma_1^2} \right), \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{1 + \gamma_2^2} \sin^2 \left(\left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \frac{kl}{2} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 \sqrt{1 + \gamma_2^2} \right), \quad (2)$$

где $\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2q}$; $\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{q^2}$; $\varepsilon_1 = 1 + \frac{2k \sin \theta}{k_0}$; $\varepsilon_2 = 2 \left(1 + \frac{k \sin \theta}{k_0} \right)$, $q = \frac{\Delta n}{n_0} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$ – параметр Рытова;

θ – угол между волновым вектором падающего света \vec{k} и фронтом звуковой волны.

Как видно из выражений (1), (2), максимальная дифракционная эффективность для каждого из порядков может быть обеспечена при выполнении следующих двух условий. Во-первых, при равенстве нулю относительной расстройки $\varepsilon_j = 0$ ($j = 1, 2$ – номер порядка дифракции), а во-вторых, при достижении аргументом синуса в каждом из выражений значения $\pi/2$, т. е. при выполнении следующих условий:

$$\frac{\Delta n}{n_0} \frac{kl}{2} = \frac{\pi}{2}, \quad \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 \frac{kl}{2} = \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Каждое из равенств включает в себя два или три множителя. Во-первых, множитель, пропорциональный изменению относительной оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, $\Delta n/n_0$, степень которого соот-

ветствует номеру порядка дифракции $j=1, 2$. Во-вторых, множитель, пропорциональный отношению волновых чисел света и звука, k/k_0 , с показателем степени, равным значению $2(j-1)$, и, наконец, множитель, равный произведению волнового числа света на длину взаимодействия kl .

Анализ равенства (2) показывает, что составляющие второго порядка обладают дополнительным свойством, которое состоит в том, что максимальное значение дифракционной эффективности при выполнении условий брэгговского синхронизма ($\theta = 2\theta_B$) зависит не только от относительного изменения коэффициента преломления $\Delta n/n_0$, но и от отношения k/k_0 при постоянных значениях длины взаимодействия l и волнового числа светового излучения k .

4. Аппаратная функция селектирующих акустооптических устройств с использованием пространственных составляющих первого и второго порядков

Основной характеристикой акустооптических фильтров является аппаратная функция, под которой обычно понимают форму полосы пропускания, т. е. зависимость дифракционной эффективности от параметров акустооптического взаимодействия (длины световой волны, частоты ультразвука и относительной оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, и т. д.). При построении селектирующих акустооптических устройств обычно интересуются максимальным значением коэффициента пропускания – максимальным значением дифракционной эффективности при $\epsilon_j = 0$ ($j=1, 2$).

Физической основой построения спектроанализаторов радиотехнического диапазона является угловая дисперсия световой волны на ультразвуковой волне, при использовании которой с изменением частоты ультразвуковой волны меняется угловое положение дифрагированной волны, при выполнении условия $kl = \text{const}$. Угол отклонения световой волны каждого из дифракционных порядков определяется соотношением

$$\text{tg } \varphi = \frac{k_2 + jk_0}{k_1}, \quad (4)$$

где j – номер дифракционного порядка; $k_2 = k \sin \theta$, $k_1 = k \cos \theta$ – проекции волнового вектора света на оси координат.

При малых значениях угла θ из выражения (4) получим соотношение, которое позволяет определить разрешающую способность спектроанализатора радиосигналов использующего j -й порядок дифракции,

$$\delta f_0 = \frac{V_0}{L} = \frac{1}{j\tau},$$

где L – длина взаимодействия света с ультразвуком, V_0 – скорость ультразвука в звукопроводе, τ – длительность обрабатываемого сигнала.

Пусть требуется построить акустооптический анализатор спектра радиотехнических сигналов при выполнении условий брэгговского синхронизма для каждого из резонансов, $\epsilon_j = 0$ ($j=1, 2$). Для этого случая с использованием выражения (1) построим зависимости дифракционной эффективности пространственных составляющих от частоты ультразвука f_0 и относительной оптической плотности ультразвуковой решетки $\Delta n/n_0$ (рис. 1).

Графики, приведенные на рис. 1, построены для следующих условий взаимодействия: скорость ультразвуковой волны в кристалле парателлурита $V_0 = 0.617 \cdot 10^5$ см/с, длина волны светового излучения $\lambda = 550$ нм, коэффициент преломления $n_0 = 2.26$, длина взаимодействия $l = 1$ см.

Как следует из рис. 1, а, дифракционная эффективность пространственной компоненты первого порядка не зависит от частоты ультразвуковой волны и принимает максимальное значение при фиксированной величине $\Delta n/n_0$. Максимальное значение дифракционной эффективности пространственной компоненты второго порядка (см. рис. 1, б) одновременно зависит как от частоты ультразвуковой волны, так и от относительной оптической плотности ультразвуковой решетки $\Delta n/n_0$.

Получим соотношение, которое позволяет определить количественный характер изменения относительной плотности оптической решетки, создаваемой звуковой волной, при которой дифракционная эффективность первого и второго порядков принимает максимальное значение. Для этого обобщим равенства (3) и представим в следующем виде:

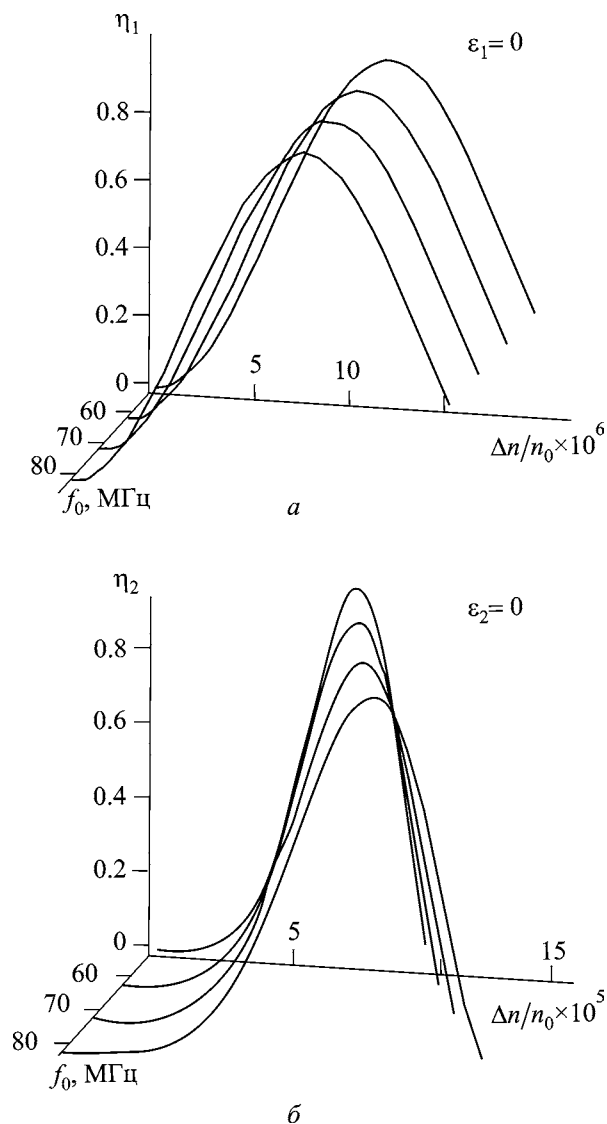


Рис. 1. Зависимости дифракционной эффективности составляющих первого (а) и второго (б) порядков от частоты ультразвука и относительного изменения оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, при выполнении условий брэгговского синхронизма, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$ и $kl = \text{const}$

$$\left(\frac{\Delta n}{n_0}\right)^j \left(\frac{k}{k_0}\right)^{2(j-1)} \frac{kl}{2} = \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Из (5) получим, что выражение, устанавливающее зависимость относительной плотности оптической решетки, при которой дифракционная эффективность первого и второго порядков принимает максимальное значение, от частоты ультразвука в случае $kl = \text{const}$, имеет вид

$$\left[\frac{\Delta n}{n_0}(f_0)_{\max}\right]_j = \left(\frac{\pi}{kl}\right)^{1/j} \left(\frac{\lambda f_0}{V_0}\right)^{1/2(j-1)}. \quad (6)$$

С использованием выражения (6) на рис. 2 построены зависимости относительной оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, которая обеспечивает максимальную дифракционную эффективность акустооптического взаимодействия, от частоты ультразвука для первого и второго порядков брэгговской дифракции при фиксированной величине kl для следующих значений длин волн светового излучения: $\lambda = 550$ нм (сплошная линия), $\lambda = 650$ нм (штриховая линия), $\lambda = 450$ нм (пунктирная линия).

Графики, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод о том, что при использовании второго порядка брэгговской дифракции для получения максимального коэффициента пропускания необходимо с увеличением частоты звуковой волны увеличивать амплитуду ультразвука, причем чем короче длина волны используемого излучения, тем больше должна быть амплитуда управляющего сигнала.

Далее изучим свойства первого и второго порядков дифракции при фиксированном значении произведения $\lambda f_0 = \text{const}$, т. е. для случая, который реализуется при построении акустооптических фильтров оптического диапазона.

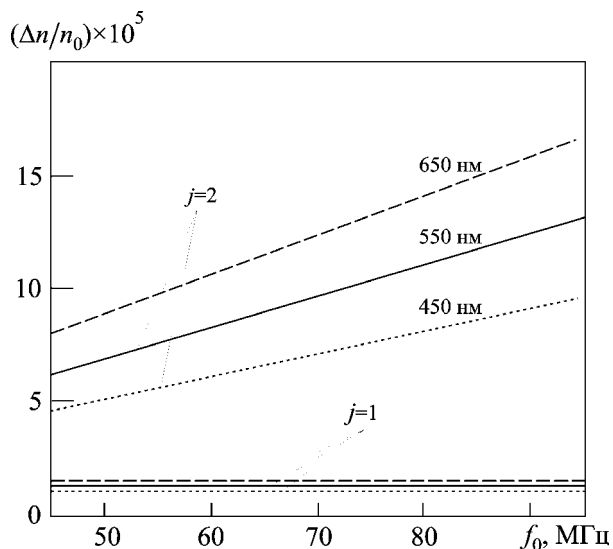


Рис. 2. Зависимости относительной оптической плотности решетки от частоты ультразвука, при которой дифракционная эффективность первого и второго порядков принимает максимальное значение, $kl = \text{const}$

Зависимости дифракционной эффективности от частоты ультразвуковой волны f_0 и относительной оптической плотности ультразвуковой решетки $\Delta n/n_0$ для рассматриваемого случая представлены на рис. 3.

Существенно, что в этом случае для получения максимальной дифракционной эффективности как первого, так и второго порядков с увеличением частоты ультразвукового сигнала необходимо изменять амплитуду управляющего сигнала.

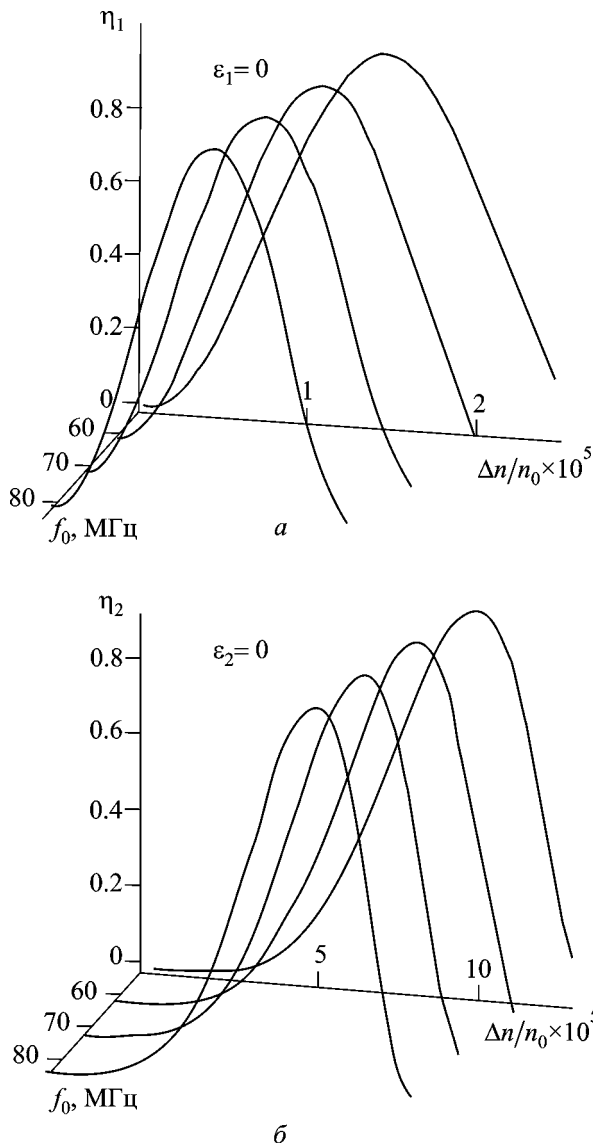


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности составляющих первого (а) и второго (б) порядков от частоты ультразвука и относительного изменения оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, при выполнении условий брэгговского синхронизма, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$ и $\lambda f_0 = \text{const}$

Для получения соотношения, которое позволяет определить количественный характер изменения относительной плотности оптической решетки, создаваемой звуковой волной, при которой дифракционная эффективность первого и второго порядков принимает максимальное значение, преобразуем выражение (6) с учетом особенностей построения акустооптических фильтров оптического диапазона к следующему виду:

$$\left[\frac{\Delta n}{n_0}(f_0)_{\max} \right]_j = \left(\frac{V_0 \sin \theta_{\text{Бср}}}{f_0 l} \right)^{1/j} \left(\frac{\lambda f_0}{V_0} \right)^{1/2(j-1)}, \quad (7)$$

где $\sin \theta_{\text{Бср}} = -k_{0\text{ср}}/2k_{\text{ср}}$, $\theta_{\text{Бср}}$ – угол, при котором выполняется условие брэгговского синхронизма для средних значений длины волны света $\lambda_{\text{ср}}$ и частоты ультразвука $f_{0\text{ср}}$.

Анализ выражения (7) показывает, что в отличие от случая $kl = \text{const}$ при фильтрации оптического излучения ($\lambda f_0 = \text{const}$) зависимость $\left[\Delta n/n_{0\text{max}} \right]_j$ от частоты ультразвука вызвана исключительно изменением первого множителя с частотой ультразвуковых колебаний f_0 .

Графики, иллюстрирующие зависимости относительной оптической плотности решетки, создаваемой звуковой волной, при которой дифракционная эффективность первого и второго порядков принимает максимальное значение,

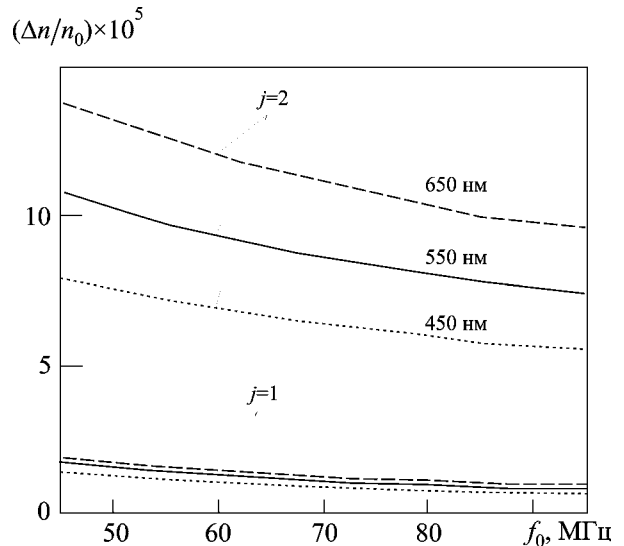


Рис. 4. Зависимости относительной оптической плотности решетки от частоты ультразвука, при которой дифракционная эффективность первых и вторых порядков принимает максимальное значение, $\lambda f_0 = \text{const}$

представлены на рис. 4. Кривые, приведенные на рис. 4, построенные с использованием выражения (7) для различных значений длины световой волны при выполнении условия $\lambda f_0 = \text{const}$, отличаются от зависимостей, представленных на рис. 2. Отличие состоит в том, что в первом случае ($kl = \text{const}$) для получения максимальной дифракционной эффективности второго порядка с увеличением частоты необходимо увеличивать амплитуду ультразвукового сигнала, а во втором случае ($\lambda f_0 = \text{const}$) для получения максимальной дифракционной эффективности как первого, так и второго порядков с увеличением частоты необходимо уменьшать амплитуду ультразвукового сигнала.

Следует отметить, что выводы и предложения, связанные с необходимостью изменения амплитуды ультразвукового сигнала с целью получения максимальной дифракционной эффективности, относятся к акустооптическим устройствам, изготовленным из одинаковых материалов при прочих равных условиях взаимодействия.

5. Заключение

Исследованы зависимости дифракционной эффективности составляющих первого и второго порядков от частоты ультразвука и относительного изменения оптической плотности решетки, создаваемой ультразвуковой волной, при выполнении условий брэгговского синхронизма для первого и второго брэгговских резонансов.

Зависимости исследованы для двух условий брэгговского взаимодействия: во-первых, для случая, который реализуется при построении спектроанализаторов радиотехнических сигналов, $kl = \text{const}$, а во-вторых, при выполнении равенства $\lambda f_0 = \text{const}$, которое реализуется при полосовой либо многоспектральной фильтрации оптического излучения.

Показано, что при построении устройств спектральной селекции радиотехнического диапазона с увеличением частоты сигнала для получения максимальной дифракционной эффективности второго порядка необходимо увеличивать амплитуду ультразвукового сигнала, а для получения максимальной дифракционной эффективности акустооптических фильтров оптического диапазона как первого, так и второго порядков с увеличением частоты необходимо уменьшать ампли-

туду ультразвукового сигнала. Это вызвано тем, что в основе селекции оптических и радиотехнических сигналов лежат различные принципы акустооптического взаимодействия. Принцип действия акустооптических спектроанализаторов радиотехнического диапазона состоит в использовании явления дисперсии света на ультразвуковой волне, а физической основой фильтров оптического диапазона являются селективные свойства акустооптического брэгговского взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голосовский О. А., Раздобудько В. В.* Акустооптические спектроанализаторы: современное состояние и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 12. – С. 43–56.
2. *Siebertz O., Schieder R., Gal C., Olbrich M., and Hartogh P.* Acousto-optical spectrometers for THz heterodyne instruments [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.researchgate.net/publication/237754888_Acousto-optical_spectrometer_for_THz_heterodyne_instruments
3. *Hillman J. J., Clenar D. A., Kuehn D. M., Chanover N. J., and Blass W. E.* Compact Imaging Spectrometers using Acousto-Optic Tunable Filters [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.stsci.edu/stsci/meetings/space_detectors/pdf/hillman.pdf
4. *Зильберман Г. Е., Сидоров И. Н., Купченко Л. Ф.* К теории дифракции света на ультразвуке // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 241–247.
5. *Купченко Л. Ф., Плахов Ю. М., Ефимова О. В., Лобьрев В. Б., Черкашина Е. Л., Шевченко А. В.* Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 342–348.

Л. Ф. Купченко, А. С. Риб'як, О. В. Єфімова

Харківський університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба,
вул. Сумська, 77/79, м. Харків, 61023, Україна

АКУСТООПТИЧНІ АНАЛІЗАТОРИ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОПТИЧНОГО ТА РАДІОТЕХНІЧНОГО ДІАПАЗОНІВ НА ОСНОВІ БРЕГГІВСЬКИХ РЕЗОНАНСІВ ВИЩИХ ПОРЯДКІВ

Наводяться результати дослідження характеристик акустооптичних спектроаналізаторів випромінювання оптичних та радіотехнічних діапазонів, базованих на використанні бреггівських резонансів першого та другого порядків. Показано, що характеристики акустооптичних пристроїв, що використовують першій та другій порядки дифракції, по-різному залежать від параметрів акустооптичної взаємодії, оскільки в основі селекції оптичних та радіотехнічних сигналів є різні принципи акустооптичної взаємодії.

L. F. Kupchenko, A. S. Rybiak, and O. V. Efimova

Ivan Kozhedub Kharkiv Air Forces University,
77/79, Sumska St., Kharkiv, Ukraine

ACOUSTO-OPTICS ANALYZERS OF SPECTRAL
COMPOSITION OF THE OPTICAL AND RADIO
FREQUENCY RADIATION BASED ON THE HIGHER-
ORDER BRAGG'S RESONANCES

The results of studies of characteristics of acousto-optics
spectrum analyzers of radiation in the optical and radio ran-

ges based on the use of Bragg resonances of the first and
second orders are showed. The characteristics of acousto-
optics devices using the first and second diffraction orders
are showed to depend differently on the parameters of acousto-
optics interaction because the selection of optical and radio
signals is based on different principles of acousto-optics
interaction.

Статья поступила в редакцию 10.02.2014