

ИНФОРМАЦИОННАЯ СЕЛЕКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВА- НИЯ ЗЕМЛИ, ОСНАЩЕННЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИМИ ФИЛЬ- ТРАМИ

Л.Ф. Купченко¹, Д.П. Пашков², Г.В. Рыбалка¹, Е.Л. Черкашина³
(¹Харьковский университет Воздушных Сил,
²Национальная академия обороны Украины, Киев,
³Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

В интересах уменьшения избыточности изображений регистрируемых видеоспектрометрами дистанционного зондирования Земли оснащенных акустооптическими фильтрами, обсуждаются методы информационной селекции изображений путем управления полосой пропускания акустооптических неколлинеарных фильтров. В статье рассмотрены три метода управления полосой пропускания. Два из рассматриваемых методов связаны с выбором условий взаимодействия световой и ультразвуковой волн, а третий предполагает использование дифракции света на нескольких ультразвуковых волнах отличающихся по частоте.

информационная селекция изображений, видеоспектры дистанционно-го зондирования Земли, акустооптические неколлинеарные фильтры

Постановка задачи. Видеоспектрметры относятся к пассивным оптоэлектронным системам, в которых реализуются принципы изображающей спектроскопии. В видеоспектрметрах используются как геометрические так и спектральные признаки, в результате чего на выходе видеоспектрметра формируется многомерное пространственно-спектральное изображение. Такое изображение называется "кубом информации", два измерения которого соответствуют пространственному изображению местности, а третье характеризует спектральные свойства принятого изображения.

Главной особенностью видеоспектральных изображений в отличие, от многоспектральных является возможность получения изображений в более чем ста спектральных каналах, тогда, тогда как многоспектральных системы позволяют получить лишь до десяти спектральных полос [1].

При создании подобного класса систем должна быть решена задача хранения и обработки пространственно-спектральных изображений обладающих чрезвычайно большой информативной емкостью, а также за-

дача, связанная с передачей изображений по радиоканалу обладающего ограниченной пропускной способностью. Действительно изображения, полученные при дистанционном зондировании Земли, обладают очень большой информативностью. Один аэроснимок может содержать свыше $64 \cdot 10^6$ бит информации [2]. Причем информационная емкость видеоспектральных изображений возрастает пропорционально числу регистрируемых спектральных каналов.

Как любое реальное изображение аэрофотоснимки обладают большой избыточностью информации. Проблему рационального формирования изображений решают путем селекции информации, например, за счет получения изображений в спектральном диапазоне, где наблюдается наибольшее различие спектральных яркостей или коэффициентов отражения исследуемых природных образований и прилегающих к ним наблюдаемых объектов.

Селекция информации, обеспечивается также путем использования программируемых спектрометров, обладающих переменной шириной полосы пропускания. Обычно используют три возможных режима работы. Режим, при котором весь исследуемый спектральный диапазон перекрывается интервалами чувствительности $\Delta\lambda$ обеспечивающих максимальную разрешающую способность, во-вторых, режим с ограниченным числом интервалов и заданной полосой пропускания $\Delta\lambda$ и, в-третьих, режим при котором реализуется ограниченное число интервалов с различной шириной полосы пропускания [3].

Известно, что в состав перспективных видеоспектрометров, предназначенных для дистанционного зондирования Земли из космоса, входят акустооптические фильтры, которые обладают возможностью программного выбора спектральных каналов в зависимости от решаемой целевой задачи. Макет такого прибора, представляющий собой совместную разработку Украины и России, испытывался на искусственном спутнике Земли "Океан-О" [4].

Вопросы электронной перестройки акустооптических фильтров по спектральному диапазону достаточно полно изучены и опубликованы в работах [5, 6]. Однако обобщающих исследований методов управления полосой пропускания акустооптических фильтров в интересах информационной селекции изображений не проводилось и является предметом изучения в настоящей работе.

Цель статьи. Обобщение исследований посвященных созданию акустооптических фильтров с управляемой полосой пропускания в интересах построения видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли с информационной селекции изображений.

Изложение материалов исследований. В статье рассмотрены три

метода управления полосой пропускания. Два из рассматриваемых методов связаны с выбором условий взаимодействия световой и ультразвуковой волн, а третий предполагает использования дифракции света на нескольких ультразвуковых волнах отличающихся по частоте.

Переходя, к обсуждению первых двух методов отметим следующее. Известно, что характеристики акустооптических фильтров определяются условиями взаимодействия световой и ультразвуковых волн. Обычно используются брэгговский режим дифракции, когда наиболее существенными оказываются составляющие нулевого порядка и одна из дифракционных компонент первого, второго или третьего порядков. Величина дифракционных составляющих может быть соизмерима с величиной падающего на звуковую волну светового излучения, взаимодействие происходит под углами кратными углу Брэгга θ_B , $2\theta_B$ и т.д. (условия брэгговских резонансов первого и высших порядков). Угол Брэгга, как известно, вычисляется из соотношения $\sin\theta_B = -k_0/2k$, где k_0 и k – волновые числа ультразвука и света соответственно.

Появление дифракционных составляющих высших порядков обусловлено многократным рассеянием света на ультразвуковой волне и поэтому эти составляющие обладают большей угловой, частотной и спектральной селективностями [7]. Следовательно, используя дифракционные компоненты первого, второго или третьего порядков можно управлять полосой пропускания акустооптических фильтров. Однако для получения максимальной дифракционной эффективности составляющей второго и последующих порядков дифракции требуется несколько большая интенсивность ультразвуковой волны, чем для первого порядка при одинаковых условиях акустооптического взаимодействия.

Таким образом, метод управления шириной полосы пропускания акустооптических неколлинеарных фильтров с использованием брэгговских резонансов первого и последующих порядков состоит в следующем. Во-первых, необходимо обеспечить взаимодействие световой и ультразвуковой волн под углами кратными углу Брэгга при этом, используя пространственную компоненту, номер которой совпадает с номером резонанса, а, во-вторых, обеспечить необходимую величину интенсивности ультразвуковой волны.

В устройствах акустооптической фильтрации информация о спектральных свойствах излучения содержится в пространственном спектре светового потока, и обычно определяется энергетическими характеристиками пространственных составляющих (дифракционной эффективностью или коэффициентом пропускания устройства). Под дифракционной эффективностью понимают отношение квадратов амплитуды дифракционной со-

ставляющей к амплитуде падающего излучения $\eta_i = |E_i/A|^2, (i=1, 2, \dots)$.

Полосу пропускания для составляющих первого и второго порядков определим, построив зависимость дифракционной эффективности от параметров акустооптического взаимодействия, воспользовавшись результатами [8]:

$$\chi_1 = \frac{1}{\tilde{R}_1^2} \sin^2 \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta n}{n_0} k \tilde{R}_1 \right); \quad (1)$$

$$\chi_2 = \frac{1}{\tilde{R}_2^2} \sin^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 k \tilde{R}_2 \right], \quad (2)$$

где $\tilde{R}_1 = \sqrt{1 + \gamma_1^2}$; $\tilde{R}_2 = \sqrt{1 + \gamma_2^2}$; $\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2q}$; $\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{q^2}$; $\varepsilon_1 = 1 - \frac{2k \sin \theta}{k_0}$;

$\varepsilon_2 = 2 \left(1 - \frac{k \sin \theta}{k_0} \right)$; l – длина взаимодействия; $q = \frac{\Delta n}{n_0} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$ – параметр

Рытова; $\Delta n/n_0$ – относительное изменение коэффициента преломления среды вызванное ультразвуком.

Из выражений (1) и (2), определим спектральную селективность как отношение $\Delta\lambda/\lambda$, где $\Delta\lambda$ – приращение длины световой волны, при которой дифракционная эффективность принимает нулевые значения. Тогда для каждой из пространственных составляющих первого и второго порядков:

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_1 = 2\sqrt{3}q; \quad \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_2 = \sqrt{3}q^2. \quad (3)$$

Очевидно, что высокие селективные свойства высших порядков дифракции могут найти практическое использование лишь в том случае, если одновременно будут определены условия взаимодействия, при которых эти свойства проявляются наряду с максимальной дифракционной эффективностью. Как видно из выражений максимальная дифракционная эффективность, для каждого из порядков может быть обеспечена при выполнении следующих двух условий. Во-первых, при равенстве нулю относительной расстройки для первого $\varepsilon_1 = 0$ или второго резонансов $\varepsilon_2 = 0$, а во-вторых, при достижении аргумента синуса в каждом из выражений $\pi/2$, т.е. при условиях:

$$\left(\frac{\Delta n}{n_0} \right) kl = \pi; \quad \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 kl = \pi. \quad (4)$$

Тогда используя соотношения (3) и (4) получим систему уравнений, которая позволяет определить выражения для спектральной селективно-

сти $\Delta\lambda/\lambda$ пространственных составляющих первого и второго порядков, когда одновременно для каждого из них реализуется максимальная дифракционная эффективность

$$(\Delta\lambda/\lambda)_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot v_0}{2 \sin \theta_B \cdot f_0 \cdot l}; \quad (\Delta\lambda/\lambda)_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot v_0}{8 \cdot \sin 2\theta_B \cdot f_0 \cdot l}, \quad (5)$$

где f_0 – частота ультразвука; v_0 – скорость ультразвука.

Таким образом, полоса пропускания акустооптических фильтров использующих первые и вторые порядки отличаются друг от друга постоянным коэффициентом, и зависит от параметров акустооптического взаимодействия и, в частности, угла взаимодействия световой и ультразвуковой волн, частоты и скорости ультразвука, а также длины взаимодействия световой и ультразвуковой волн.

С увеличением частоты ультразвука условия брэгговского синхронизма выполняются в более узком спектральном диапазоне. Следовательно, изменяя период дифракционной решетки вызванной ультразвуковой волной, возможно, осуществлять управление шириной полосы пропускания. Однако, с изменением частоты ультразвука необходимо одновременно изменять угол взаимодействия, чтобы обеспечить условия брэгговского синхронизма. Таким образом, можно следующим образом сформулировать метод управления полосой пропускания акустооптических фильтров путем изменения условий брэгговского синхронизма. Метод заключается в том, что дискретно изменяется угол Брэгга и в соответствии с этим выбирается диапазон частот ультразвука, в пределах которого осуществляется перестройка центра полосы пропускания в заданном участке спектра оптического излучения.

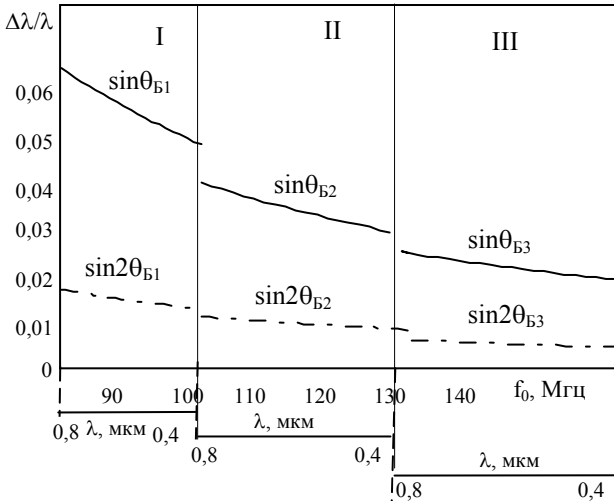


Рис. 1. Графики спектральной селективности

С использованием выражений (5) построены графики спектральной селективности от частоты ультразвука при трех различных углах взаимодействия света с ультразвуковой волной θ_{Bi} ($i = 1, 2, 3$) для первого брэгговского резонанса и $2\theta_{Bi}$ для второго, позволяющие проанализировать эффек-

тивность двух методов управления полосой пропускания (рис. 1).

Сплошными линиями изображены зависимости разрешающей способности акустооптического фильтра, построенного с использованием составляющих первого порядка дифракции, а пунктиром зависимость для вторых порядков. Существенно, что в пределах каждого из угловых диапазонов осуществляется селекция одного и того же интервала светового спектра, в рассматриваемом примере, в диапазоне (0,4 ... 0,8) мкм.

Переходя к обсуждению результатов необходимо отметить, следующее. С изменением частоты ультразвука происходит не только перестройка центра полосы пропускания, но также изменение ширины полосы. Оценки показывают, что при переходе с первого углового диапазона на второй полоса изменяется примерно в полтора раза, а из первого диапазона в третий в два с половиной раза.

В пределах каждого из угловых диапазонов можно реализовать первый или второй резонансы при углах взаимодействия равных $\theta_{Б1}$ или $2\theta_{Б1}$, что позволяет дополнительно, примерно в четыре раза, уменьшить полосу пропускания в пределах каждого из угловых (частотных) диапазонов.

Зависимости построены для случая, когда в качестве звукопровода используется кристалл парателурита, у которого при выбранной геометрии взаимодействия скорость распространения ультразвука составляет $0,617 \cdot 10^5$ см/с, а коэффициент преломления для обыкновенной волны равен $n_0 = 2,26$.

Средние значение частот в каждом из трех частотных диапазонов выбирались равными 90, 115, 150 МГц, а углы взаимодействия в каждом из диапазонов были вычислены для длины световой волны равной 0,63 мкм и составили для первого брэгговского резонанса $\theta_{Б1} = 0,02$ рад, $\theta_{Б2} = 0,024$ рад, $\theta_{Б3} = 0,034$ рад.

Третий метод управления полосой пропускания неколлинеарного акустооптического фильтра предполагает использования дифракции света на двух ультразвуковых волнах отличающихся по частоте. Сущность предлагаемого способа состоит в том, что при рассеянии света на ультразвуковых волнах близких по частоте, условия брэгговского синхронизма будут выполняться в спектральном диапазоне, значение которого связано с разностью по частоте δf_0 между ультразвуковыми волнами. Следовательно, селективность брэгговской дифракции в этом случае будет зависеть от частотных характеристик ультразвукового сигнала.

Дифракция света на нескольких пространственно совмещенных ультразвуковых волнах является распространенной задачей, решаемых в акустооптике и имеющих практический интерес. В работе [9] получены

аналитические выражения при дифракции света на двух ультразвуковых волнах, создаваемых одним возбудителем ультразвука. При решении задачи предполагалось, что частоты ультразвуковых волн f_{01} и f_{02} расположены симметрично относительно частоты брэгговского синхронизма f_0 . В режиме дифракции Брэгга дифракционная картина содержит пространственные составляющие только нулевого и первого порядков. Причем составляющая первого порядка включает в свой состав компоненту E_{01} , рассеянную ультразвуковой волной с частотой f_{01} , и компоненту E_{10} , рассеянную ультразвуковой волной с частотой f_{02} , которые конкурируют друг с другом через нулевой порядок дифракции E_{00} .

Для пояснения свойств акустооптического фильтра с управляемой полосой пропускания на основе дифракции света на двух ультразвуковых волнах воспользуемся выражениями для амплитуд световых волн рассеянных звуковыми волнами с частотами f_{01} и f_{02} [9]:

$$\psi_{10} = C_1 T_{10}^{(1)} \exp(-iQ\lambda_1) + C_2 T_{10}^{(2)} \exp(-iQ\lambda_2) + C_3 T_{10}^{(3)} \exp(-iQ\lambda_3), \quad (6)$$

$$\psi_{01} = C_1 T_{01}^{(1)} \exp(-iQ\lambda_1) + C_2 T_{01}^{(2)} \exp(-iQ\lambda_2) + C_3 T_{01}^{(3)} \exp(-iQ\lambda_3).$$

Коэффициенты λ_1, λ_2 и λ_3 определяют разрешенные направления распространения света в ультразвуковом поле и находятся в результате решения следующего уравнения:

$$\lambda^3 - \lambda(\varepsilon_1^2 + q_1^2 + \gamma q_2^2) + \varepsilon_1(q_1^2 - q_2^2 \gamma^2) = 0, \quad (7)$$

где $q_1 = \alpha_1 k^2 / n_0 k_{01}^2$; $q_2 = \alpha_2 k^2 / n_0 k_{02}^2$; α_1 и α_2 – коэффициенты акустооптической связи, величина которых пропорциональна амплитудам ультразвуковых волн с частотами f_{01} и f_{02} ; $\varepsilon_1 = 1 - \sin\theta / \sin\theta_B = \Delta f_{01} / f_0$ – относительная частотная расстройка от условий брэгговского синхронизма.

Математическую модель исследуем в зависимости от обобщенные параметров $q_1^2 / \varepsilon_1^2 = u$, $\gamma^2 q_2^2 / \varepsilon_1^2 = v$ полагая, что $\lambda = t\varepsilon_1$. Тогда кубическое уравнение будет иметь следующий вид:

$$t^3 - t(1 + u + v) - (u - v) = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты, входящие в эти соотношения будут определяться из следующих уравнений:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1; \quad C_1 T_{10}^{(1)} + C_2 T_{10}^{(2)} + C_3 T_{10}^{(3)} = 0; \quad C_1 T_{01}^{(1)} + C_2 T_{01}^{(2)} + C_3 T_{01}^{(3)} = 0, \quad (9)$$

где $T_{10}^{(1)} = -\frac{q_1}{\lambda_1 - \varepsilon_1}$; $T_{10}^{(2)} = -\frac{q_1}{\lambda_2 - \varepsilon_1}$; $T_{10}^{(3)} = -\frac{q_1}{\lambda_3 - \varepsilon_1}$; $T_{01}^{(1)} = \frac{q_2 \gamma}{\lambda_1 - \gamma \varepsilon_2}$;

$$T_{01}^{(2)} = \frac{Q_2 \gamma}{\lambda_2 - \gamma \varepsilon_2}; \quad T_{01}^{(2)} = \frac{Q_2 \gamma}{\lambda_3 - \gamma \varepsilon_2}.$$

Селективные свойства неколлинеарного акустооптического взаимодействия определим на основании зависимости дифракционной эффективности составляющей первого порядка. Существенно, что составляющая первого порядка теперь будет включать две пространственные компоненты E_{01} и E_{10} , собственные величины которых будут зависеть от параметров акустооптического взаимодействия. Прежде всего, от амплитуды каждой из двух ультразвуковых волн, селективности брэгговского взаимодействия, определяемой значением параметра Клейна-Кука $Q = k_0^2 l / k$, а также от того, на сколько ультразвуковые волны отличаются по частоте δf_0 друг от друга.

График представленный на рис. 2, иллюстрирует зависимость дифракционной эффективности первого порядка дифракции при рассеянии на двух ультразвуковых волнах от разности частот δf_0 между ними 1 при $-\delta f_0 = 1$ МГц, 2 при $-\delta f_0 = 2$ МГц, 3 при $-\delta f_0 = 3$ МГц, 4 при $-\delta f_0 = 4$ МГц. Графики построены для случая, когда в качестве звукопровода используется кристалл парателлурита. Условия брэгговского синхронизма вычислены для частоты ультразвука равной 60 МГц, и длины световой волны 0,63 мкм. При вычислении предполагалось, что амплитуда каждой из ультразвуковых волн постоянна и обеспечивает изменение коэффициента преломления в звуковом поле $\Delta n / n = 10^{-5}$. Длина взаимодействия $l = 0,8$ см.

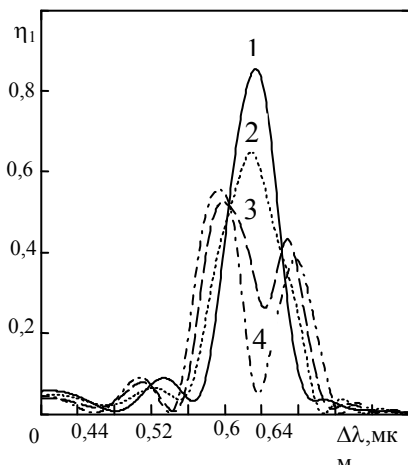


Рис. 2. График зависимости дифракционной эффективности от разности частот

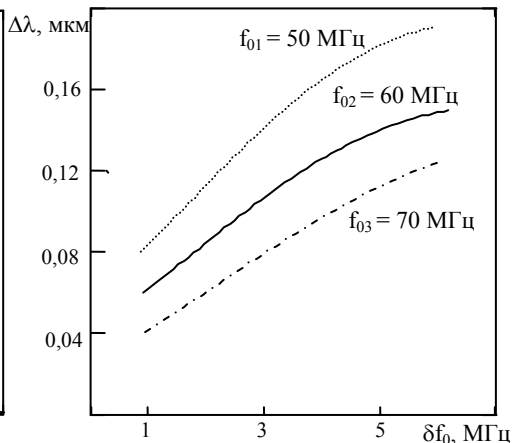


Рис. 3. График зависимости селективных свойств неcollinearного взаимодействия в зависимости от разности частот

Из графика следует, что с увеличением различия по частоте между ультразвуковыми волнами полоса длин волн, в пределах которой выполняются условия синхронизма, возрастает с одновременным изменением формы исследуемой зависимости. Причем при некоторых значениях δf_0 появляется провал, свидетельствующий о том, что дифракция световой волны происходит отдельно на каждой из ультразвуковых волн.

На рис. 3 изображен график зависимости селективных свойств неcollinearного взаимодействия при дифракции света на двух ультразвуковых волнах в зависимости от разности частот между ними δf_0 при различных значениях средней частоты ультразвука. В рассматриваемом случае средняя частота ультразвуковой волны выбиралась равной $f_{01} = 50$ МГц; $f_{02} = 60$ МГц; $f_{03} = 70$ МГц. Графики отображают зависимость полосы длин волн, $\Delta\lambda$ в пределах которой дифракционная эффективность составляющей первого порядка не превышает половины от максимального значения. Как следует из графиков, использование двухчастотного режима акустооптического взаимодействия позволяет изменить селективные свойства первого порядка дифракции (полосу пропускания акустооптического фильтра) примерно в два раза.

Выводы. Проблема информационной селекции изображений в видеоспектрометрах дистанционного зондирования Земли обычно решается либо путем рационального выбора спектрального диапазона, в котором природные образования обладают максимальной яркостью либо пу-

тем использования программируемых спектрометров, обладающих переменной шириной полосы пропускания. В статье рассмотрены методы управления шириной полосы пропускания акустооптических фильтров, в интересах построения программируемых спектрометров, входящих в состав видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли.

Метод использования высших порядков брэгговской дифракции предполагает дифракцию света на ультразвуковой волне под углами кратными углу Брэгга. При определенных параметрах акустооптического взаимодействия использование составляющих вторых порядков дифракции позволяет уменьшить полосу пропускания примерно в четыре раза.

Метод управления полосой пропускания акустооптических фильтров реализуется путем изменения условий брэгговского синхронизма и заключается в том, что дискретно изменяется угол Брэгга и в соответствии с этим выбирается диапазон частот ультразвука, в пределах которого осуществляется перестройка центра полосы пропускания в заданном участке спектра оптического излучения.

Третий, из рассмотренных в статье методов, предполагает использования дифракции света на двух ультразвуковых волнах отличающихся по частоте. Показано, что с изменением разности частот между ультразвуковыми волнами полоса пропускания фильтра может изменяться примерно в два раза.

Результаты исследований могут служить научно-техническим обоснованием для создания акустооптических фильтров неколлинеарного типа с перестройкой полосы пропускания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.И. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*. – 1998. – Т. 4., № 1. – С. 29 – 39.
2. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учебное пособие для вузов / В.И. Кодинцев, В.И. Орлов, М.Л. Белов и др. Под ред. В.Н. Рождественский. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 58 с.
3. Мишев Д. Дистанционные исследования Земли из космоса: Пер. с болг. – М.: Мир, 1985. – 232 с.
4. Волошин В.И., Драновский В.И., Бушуев Г.П. Состояние, перспективы и проблемы рынка услуг дистанционного зондирования Земли из космоса // *Природа. Людина. Суспільство*. – 2002. – № 3. – С. 23 – 36.
5. Парыгин В.И., Вершубский А.В., Хохлов К.А., Акустооптическая фильтрация с помощью звуковых цугов малой длительности // *Журнал технической физики*. – 2000. – Т. 70, вып. 8. – С. 91 – 96.
6. Магдич Л.Н. Аппаратная функция акустооптического фильтра при перестройке частоты // *Оптика и спектроскопия*. – 1980. – Т. 49, вып. 2. –

С. 387 – 390.

7. 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.
8. Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга / Л.Ф. Купченко, Ю.М. Плахов, О.В. Ефимова, В.Б. Лобырев, Е.Л. Черкашина, А.В. Шевченко // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 342 – 348.
9. Купченко Л.Ф., Рыбалка Г.В., Ефимова О.В. Дифракция света на двух ультразвуковых волнах с различными частотами // *Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр.* – Х.: НАНУ, Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. – 2004. – Т. 9, № 3. – С. 503 – 521.

Поступила 16.09.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.И. Замятин,
Харьковский университет Воздушных Сил.
