

Повышение выходного оптического сигнала акустооптического монохроматора при частотной модуляции управляющего сигнала

© М.М. Мазур, Л.И. Мазур, Ю.А. Судденко, В.Н. Шорин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570 Менделеево, Московская обл., Россия

e-mail: s-mmazur@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2018 г.

Впервые экспериментально проведено исследование угловой апертуры акустооптического фильтра при линейно частотно модулированном управляющем сигнале. Результаты исследований спектральных и угловых зависимостей передаточной функции фильтра при частотной модуляции демонстрируют возможность радикального увеличения выходного оптического сигнала. При выбранной конструкции акустооптического фильтра величина оптического сигнала была увеличена в 2000 раз. Это позволяет получить выигрыш по времени измерения или по величине регистрируемого оптического сигнала. Такое увеличение сигнала при ЛЧМ обеспечивается за счет увеличения угловой апертуры и расширения спектральной полосы пропускания и требуемым для этого расширения полосы пропорциональным увеличением мощности управляющего сигнала.

DOI: 10.21883/OS.2018.10.46715.164-18

Акустооптические (АО) фильтры обладают рядом замечательных свойств: электронным управлением, быстрой и произвольной перестройкой по спектральному диапазону, возможностью передавать спектральные изображения. Однако при использовании АО фильтров существуют и некоторые неудобства: спектральная полоса пропускания АО фильтра задается при его изготовлении и определяется материалом, ориентацией АО ячейки и длиной АО взаимодействия [1].

Создание АО фильтров, в которых программным образом можно изменять спектральную полосу пропускания, существенно расширяет функциональные возможности использования таких приборов. Такие возможности особенно важны при регистрации спектральных изображений объектов с малой яркостью или за малое время.

В работе [2] было показано, что при помощи линейной частотной модуляции (ЛЧМ) можно управлять шириной аппаратной функции АО фильтра, однако в этой работе не было показано, что можно увеличить общий световой поток при такой модуляции. В работе [3] была продемонстрирована возможность управления полосой двухкристального АО фильтра изображений и повышения уровня сигнала на фотоприемнике примерно в три раза при помощи частотной модуляции управляющего сигнала. Подробное исследование спектральных характеристик АО фильтра при частотной модуляции ультразвуковой волны было выполнено в работе [4].

В настоящей работе мы провели исследование угловой апертуры и спектральной полосы пропускания АО фильтра при ЛЧМ управляющем сигнале.

Описание экспериментальной установки

Для исследования возможностей управления спектральной полосой и угловой апертурой при частотной модуляции ультразвуковой волны был изготовлен неколлинеарный АО фильтр на кристалле парателлуриата. Был разработан управляемый от компьютера генератор ВЧ сигнала с частотной модуляцией, в котором программным образом можно было задавать период и амплитуду модуляции, а также профиль изменения частоты. Генератор ВЧ сигнала построен на микросхеме прямого цифрового синтеза (DDS) AD9954. Микросхема имеет встроенную память для записи профиля частотной модуляции произвольной формы и позволяет с шагом от 10 ns перестраивать частоту. Уровень выходного сигнала управляется программно.

В наших экспериментах АО фильтр работал в непрерывном режиме до уровня управляющей мощности 2.2 W. Представленные в дальнейшем экспериментальные результаты были получены при периоде ЛЧМ $t = 4 \mu s$. Как ранее нами было показано [3,4] для исследуемого АО фильтра, такой период модуляции оптимален — он обеспечивает ситуацию, при которой каждый световой луч взаимодействует со всеми звуковыми частотами один раз.

На рис. 1 представлены схема неколлинеарной АО ячейки, частотная зависимость управляющего сигнала и форма текущего распределения частоты ультразвукового сигнала для различных пространственно расположенных световых лучей.

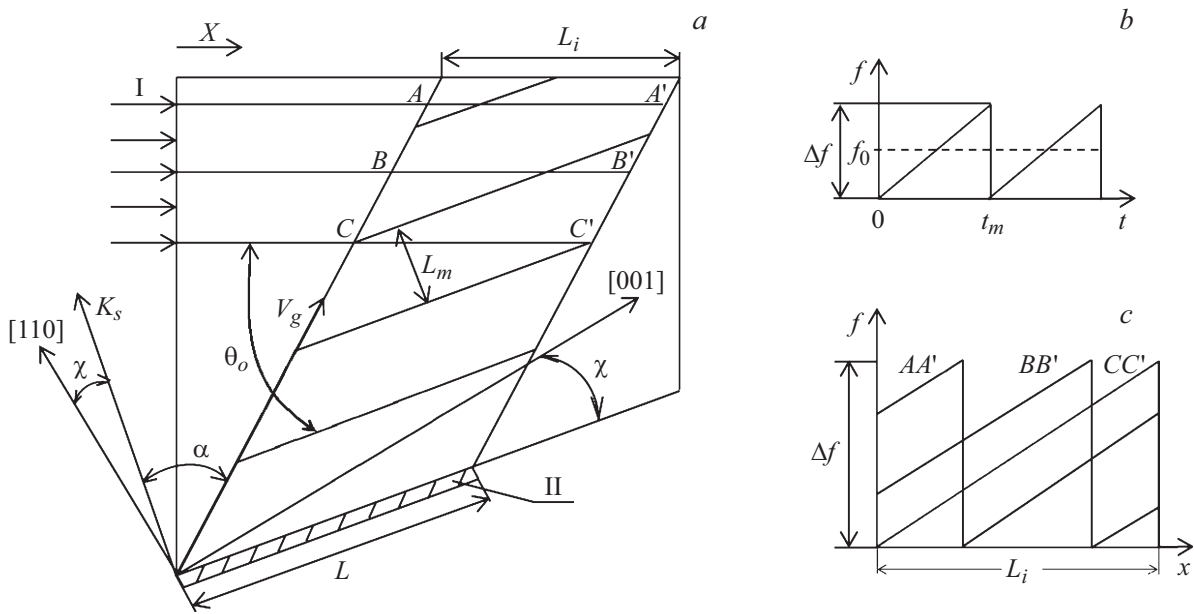


Рис. 1. Схема взаимодействия светового пучка и ЛЧМ ультразвуковой волны. (а) I — падающий световой пучок, II — ультразвуковой преобразователь, [110] и [001] — кристаллографические направления, L — длина ультразвукового преобразователя, L_i — длина взаимодействия, L_m — пространственный период модуляции частоты звуковой волны, K_s — волновой вектор звуковой волны, V_g — направление групповой скорости звуковой волны, θ и φ — углы, характеризующие направления распространения света и звука, α — угол отклонения звукового пучка от направления фазовой скорости. (б) Временная зависимость частоты звуковой волны. Δf — амплитуда девиации частоты, f_0 — средняя частота, t_m — период модуляции. (с) Пространственное распределение звуковых частот на пути трех различных лучей в пределах падающего светового пучка при соотношении $t_m = t_0(1)$.

Неколлинеарная геометрия взаимодействия света и звука в АО фильтре впервые предложена в работе [5]. В исследуемом АО фильтре направление распространения оптического луча обыкновенной поляризации 14.4° к оси 001, направление распространения сдвиговой ультразвуковой волны 7.1° к оси 110. Выходная грань АО фильтра наклонена по отношению к входной грани таким образом, чтобы дифрагированная волна распространялась примерно параллельно падающей. Длина ультразвукового преобразователя 24 мм, ширина ультразвукового пучка 6 мм. Для возбуждения необходимой для АО взаимодействия сдвиговой ультразвуковой волны возбуждалась продольная звуковая волна с последующей конверсией в сдвиговую волну [6].

Исследование спектральных зависимостей передаточных характеристик АО фильтра выполнялось на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 plus. АО ячейка фильтра размещалась в измерительном канале спектрофотометра между двумя поляризаторами Pol-1 и Pol-2. На входе в кюветное отделение спектрофотометра была установлена горизонтальная щелевая диафрагма (D-1) шириной 6 мм для согласования высоты светового луча с апертурой звукового пучка в АО ячейке, на выходе измерительного канала была установлена вертикальная щелевая диафрагма (D-2) шириной 2 мм для ограничения угловой апертуры светового пучка в плоскости дифракции. Калибровка спектрофотометра выполнялась в отсутствие АО ячейки и при параллельном распо-

ложении поляризаторов. После выполнения калибровки спектрофотометра АО ячейка устанавливалась в измерительный канал, и выходной поляризатор поворачивался на 90° . Измерения выполнялись при спектральной ширине светового пучка 0.5 нм с шагом 0.1 нм. Период между регистрациями коэффициента пропускания в соседних спектральных точках, включая время перестройки частоты и время измерения в опорном канале, составлял около 130 мс, что во много раз больше периода модуляции частоты $t_0 = 4 \mu\text{s}$, поэтому регистрировались усредненные по времени передаточные характеристики АО фильтра.

Схема измерения угловых характеристик АО фильтра представлена на рис. 2, б. Использовался He-Ne-лазер с длиной волны излучения 632.8 нм и диаметром светового пучка около 1.5 мм. Световой луч через отверстие в экране направлялся на АО фильтр. Фильтр был установлен на поворотном устройстве, обеспечивающем поворот как в горизонтальной (полярной), так и в вертикальной (аксиальной) плоскости. Углы наклона фильтра φ рассчитывались из измеренных величин перемещения на экране лазерного луча, отраженного от передней грани АО фильтра (рис. 2, б).

$$\varphi = 0.5 \times \tan^{-1}(x/L). \quad (1)$$

Девиация частоты осуществлялась симметрично относительно частоты (80 МГц) ультразвуковой волны, соответствующей частотному синхронизму лазерного

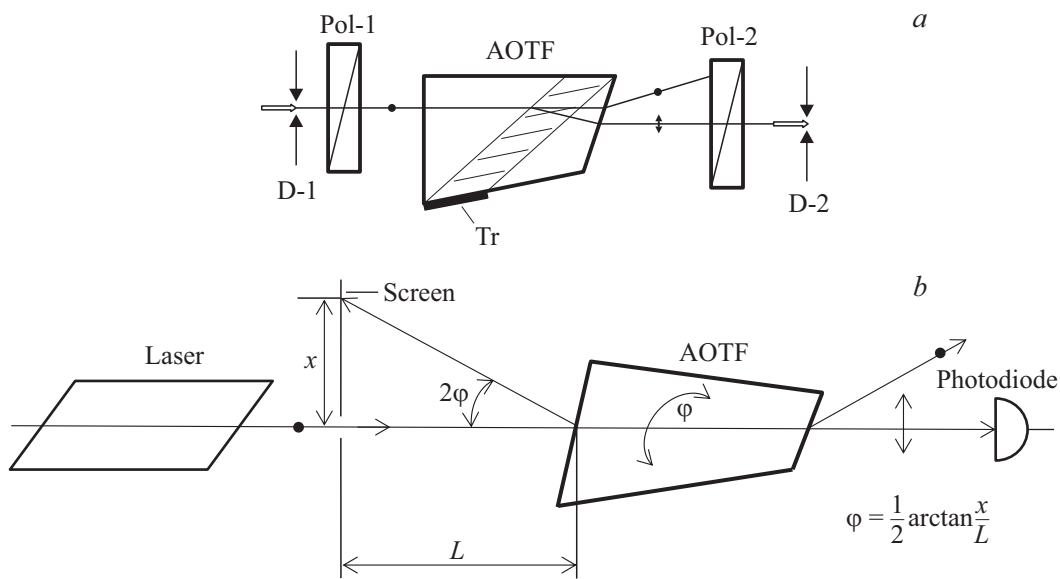


Рис. 2. Схемы измерения (а) спектральных и (б) угловых характеристик АО фильтра (AOTF).

излучения при перпендикулярном падении на входную грань АО фильтра. Временное разрешение при исследовании угловых характеристик АО фильтра было около $0.1 \mu\text{s}$, что позволяло регистрировать колебания величины передаточной характеристики АО фильтра с периодом модуляции $4 \mu\text{s}$.

Результаты экспериментальных исследований

Измерения спектральных зависимостей передаточных характеристик АО фильтра выполнялись в различных участках спектрального диапазона АО фильтра и различных величинах девиации частоты. На рис. 3 представлены результаты измерений аппаратной функции (АФ) с центральной длиной волны $\lambda_0 = 603 \text{ nm}$, что соответствует частоте синхронизма ультразвуковой волны $f_0 = 85 \text{ MHz}$. При разных величинах девиации частоты Δf управляющая ВЧ мощность изменялась от 0.1 W при $\Delta f = 0 \text{ MHz}$ до 1.6 W при $\Delta f = 6 \text{ MHz}$ таким образом, чтобы максимум эффективности дифракции составлял не менее 70% .

Ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$ определяется как ширина аппаратной функции на полувысоте кривой.

Угловые зависимости передаточных характеристик АО фильтра измерялись по схеме, представленной на рис. 2, б, углы поворота АО фильтра рассчитывались по формуле (1). На рис. 4 представлены угловые зависимости передаточной характеристики АО фильтра для величины девиации частоты $\Delta f = 5 \text{ MHz}$. Как видно из представленных графиков, средний по времени коэффициент пропускания АО фильтра при ВЧ мощности 1.2 W превышает 60% . Максимальные значения пульсаций передаточной характеристики не превышают 10% . Угловая

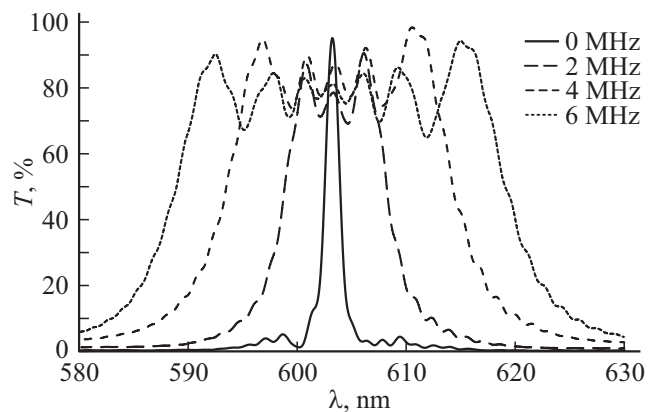


Рис. 3. Спектральные зависимости аппаратных функций при различных величинах девиации частоты.

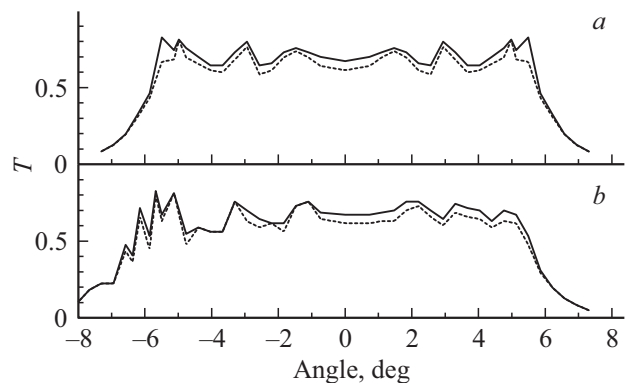


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента пропускания АО фильтра в аксиальной (а) и полярной (б) плоскостях при девиации частоты $\Delta f = 5 \text{ MHz}$ и ВЧ мощности 1.2 W : максимальные (сплошная линия) и минимальные (штриховая линия) значения передаточной функции.

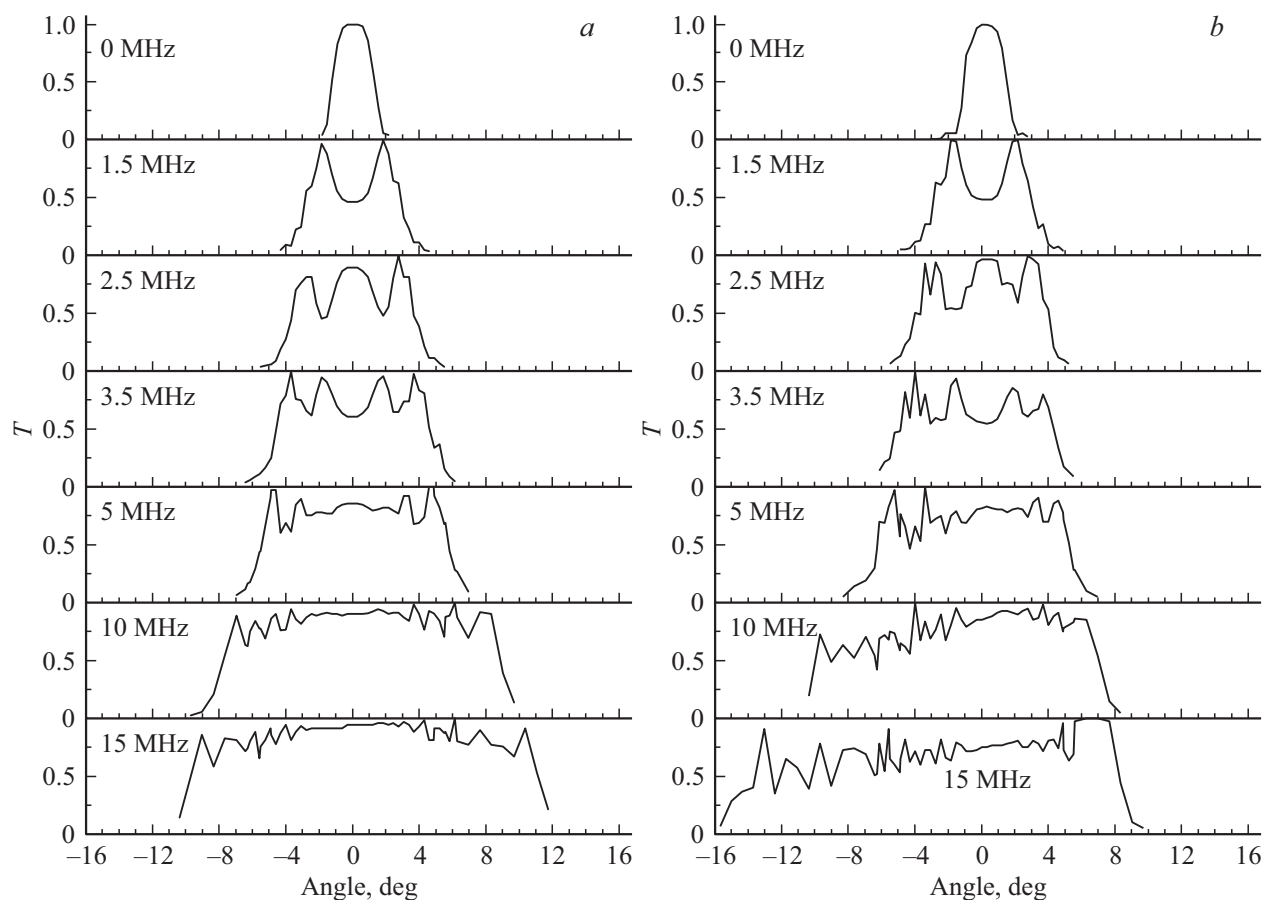


Рис. 5. Нормированные усредненные по времени угловые зависимости коэффициента пропускания АО фильтра в аксиальной (а) и полярной (б) плоскостях при различной девиации частоты Δf .

апертура φ АО фильтра определяется как ширина угловой зависимости коэффициента пропускания на полувысоте кривой.

При заданном периоде модуляции и для конкретной конструкции АО ячейки значения передаточной характеристики зависят от длины волны света, мощности и величины девиации частоты ультразвука. На рис. 5 представлены средние значения нормированных угловых зависимостей передаточных характеристик АО фильтра при различных значениях девиации частоты. Измерения угловых зависимостей передаточной функции проводились при малых ($\leq 50\%$) значениях дифракционной эффективности. Для более наглядного сопоставления передаточных угловых характеристик АО фильтра при различных значениях девиации частоты передаточные функции для каждого значения девиации частоты нормировались на свое максимальное значение.

Обсуждение и выводы

Результаты наших исследований продемонстрировали, что при частотной модуляции достигается средняя эффективность дифракции на вершине аппаратной функции на уровне 75–85% для широкого диапазона

величин частотной девиации ультразвука. При частотной модуляции также расширяется угловая апертура АО фильтра. На рис. 6 представлены зависимости ширины полосы пропускания $\Delta\lambda$ и угловой апертуры АО фильтра от величины девиации частоты. Ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$ линейно зависит от величины девиации частоты Δf . Угловая апертура в азимутальной плоскости близка к корневой зависимости от Δf , а угловая апертура в полярной плоскости несколько больше, чем в азимутальной плоскости, и при значительных девиациях частоты становится несимметричной.

Количество световой энергии, которое можно передать через АО фильтр, пропорционально произведению ширины полосы пропускания $\Delta\lambda$ на телесную угловую апертуру фильтра. На рис. 7 представлены результаты произведения ширины полосы пропускания $\Delta\lambda$ на квадрат угловой апертуры фильтра в зависимости от величины девиации частоты. Эти результаты на графике обозначены квадратами. Треугольник на графике в точке по оси абсцисс $\Delta f = 0.2 \text{ MHz}$, соответствующей ширине обращенной (при фиксированной длине волны света) аппаратной функции, — это результат произведения квадрата угловой апертуры на ширину полосы пропускания $\Delta\lambda$ АО фильтра без девиации частоты.

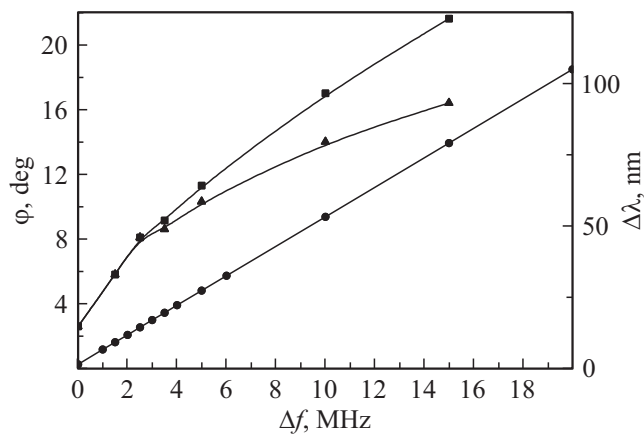


Рис. 6. Зависимости спектральной ширины и угловой апертуры АО фильтра от величины девиации частоты (кружками показаны значения спектральной ширины, квадратами — значения угловой апертуры в полярной плоскости, треугольниками — значения угловой апертуры в азимутальной плоскости).

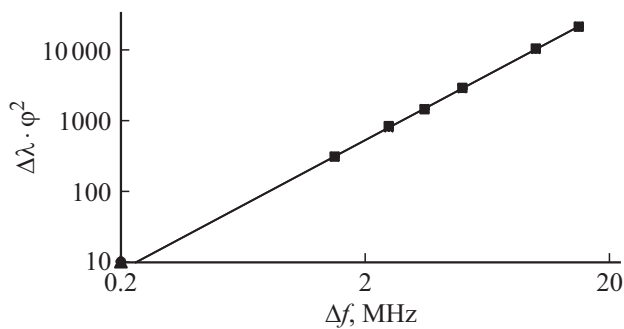


Рис. 7. Зависимость произведения квадрата угловой апертуры на спектральную полосу АО фильтра от величины девиации управляющей частоты.

При расчете телесной угловой апертуры использованы меньшие значения угловой апертуры АО фильтра (в аксиальной плоскости). Полученные точки в логарифмическом масштабе хорошо ложатся на прямую линию. Эта линия при продолжении в область малых величин Δf проходит вблизи точки, обозначенной треугольником, что свидетельствует о том, что при величинах девиации частоты меньше и близких к ширине обращенной аппаратной функции АО фильтра существенного изменения аппаратной функции не происходит.

Результаты исследований спектральных и угловых зависимостей передаточной функции АО фильтра при частотной модуляции демонстрируют возможность радикального увеличения выходного оптического сигнала в АО спектральных приборах за счет ЛЧМ управления АО фильтра.

При выбранной конструкции АО фильтра величина оптического сигнала, который может быть передан через АОМ, может быть увеличена в примерно в $2 \cdot 10^3$ раз при изменении частоты девиации частоты звуковой вол-

ны от 0 до 15 МГц. Таким образом, за счет расширения спектральной полосы АО фильтра и увеличения угловой апертуры оптический сигнал на выходе фильтра может быть увеличен в тысячу раз. Это позволяет получить выигрыш по времени измерения или по величине регистрируемого оптического сигнала.

Такие АО фильтры могут быть применены для систем регистрации спектральных изображений подстилающих поверхностей, в которых зачастую нет необходимости в высоком спектральном разрешении, но необходима быстрая регистрация спектральных изображений. Так как при больших величинах девиации частоты угловая апертура монохроматического излучения резко возрастает, то во избежание искажений изображений следует использовать оптическую систему с телецентрическим ходом лучей в области АО взаимодействия [7].

Применение ЛЧМ звуковой волны в АО фильтрах открывает новые возможности по созданию адаптивных акустооптических спектрометров и фильтров, а также значительного увеличения величины оптического сигнала.

Список литературы

- [1] Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
- [2] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я., Пономарева И.П. // Опт. и спектр. 1984. Т. 56. № 4. С. 736.
- [3] Мазур М.М., Судденко Ю.А., Шорин В.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 4. С. 56; Mazur M.M., Suddenok Y.A., Shorin V.N. // Techn. Phys. Lett. 2014. V. 40 № 2. С. 167. doi 10.1134/S1063785014020254
- [4] Мазур М.М., Пустовойт В.И., Судденко Ю.А., Шорин В.Н. // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 2. № 4 (9). С. 116.
- [5] Chang I.C. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. P. 370.
- [6] Мазур М.М. Автореф. докт. дис. М.: НТЦ УП РАН, 2007.
- [7] Suhre D.R., Denes L.J., Gupta N. // Appl. Opt. 2014. V. 43. N 6. P. 1255–1260. doi 10.1364/AO.43.001255