

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР КАК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

О.С. МАЛЬЦЕВ, М.В. ДАВЫДОВ, М.П. ФЕДОРИНЧИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию*

**Аннотация.** Представлена возможная методика управления и контроля параметров перестраиваемого акустооптического фильтра, приведена структура аппаратной части, позволяющей реализовать данную методику. Представлены результаты исследования комплексного импеданса пьезопреобразователя из  $\text{LiNbO}_3$  с рабочей полосой частот 90-120 МГц.

*Ключевые слова:* ПАОФ, акустооптика, ниобат лития, пьезопреобразователь.

**Abstract.** A technique for controlling and testing the parameters of a tunable acousto-optic filter is suggested, the structure of the hardware part allowing to implement this technique is given. The research result of the  $\text{LiNbO}_3$  piezoelectric transistor complex impedance with a working frequency band of 90-120 MHz are presented.

*Keywords:* AOTF, acoustooptics, lithium niobate, piezoelectric transducer.

### Введение

Мониторинг окружающей среды в настоящее время является одной из важнейших приоритетов для мирового сообщества. Это обусловлено тем, что человечество столкнулось с негативным влиянием технического прогресса на окружающий мир.

Задача мониторинга – комплексная и включает в себя множество направлений, например, контроль за качественным и количественным составом атмосферы и гидросферы Земли. Эти направления можно считать во многом приоритетными, т.к. именно атмосфера и гидросфера оказывают определяющие воздействия на существующий биоценоз.

Широкое применение нашли методы дистанционного исследования окружающей среды. В основе научно-исследовательских технических систем, обеспечивающих выполнение данных исследований, лежат методы оптической спектрометрии – анализ спектра излучения, переизлучения, поглощения различными веществами путем регистрации флуоресценции после воздействия на исследуемое вещество каким-либо излучением (УФ,ИК) [1].

Конкретный выбор диапазона длин излучения и типа (широполосный или лазерный) определяется решаемой задачей, однако в основе системы лежит единый метод – дисперсионный. Дисперсионный метод основан на выделении нужной спектральной полосы в результате разложения излучения в спектр. В качестве диспергирующего элемента, разлагающего излучение в спектр, используются призмы, дифракционные решетки, интерферометры [2].

Диспергирующим элементом является и перестраиваемый акустооптический фильтр. В данном докладе представлена методика программного управления параметрами перестраиваемого акустооптического фильтра.

### Постановка задачи и методика ее решения

Одним из способов повышения эффективности работы ПАОФ и улучшения его технических параметров является усовершенствование системы управления (драйвера) ПАОФ. Развитие современной элементной базы позволяет реализовать не только подачу необходимого уровня мощности на заданной частоте, но и обеспечить коррекцию величины мощности в масштабе реального времени. Для того, чтобы сформулировать требования к методике управления параметрами ПАОФ, необходимо рассмотреть принцип работы ПАОФ и его основные технические параметры.

Перестраиваемый акустооптический фильтр (ПАОФ) предназначен для выделения из светового луча с широким спектром узкого спектрального диапазона и перестройки центральной длины волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [3].

ПАОФ, предназначенный для спектроскопии, состоит из акустооптического анизотропного кристалла диоксида теллура или кварца, к которому присоединен пьезоэлектрический преобразователь. При подаче высокочастотного электрического сигнала на пьезопреобразователь (ПП), возникает обратный пьезоэлектрический эффект [4] и ПП преобразует электрические колебания в акустические. В настоящее время при выборе материалов для ПАОФ предпочтение отдается диоксиду теллура, т.к. функционален во всей видимой и инфракрасной областях оптического спектра, вплоть до  $\sim 5,5$  микрометровых волн, а конструктивно работа в данном диапазоне обеспечивается неcollinearной конструкцией ПАОФ.

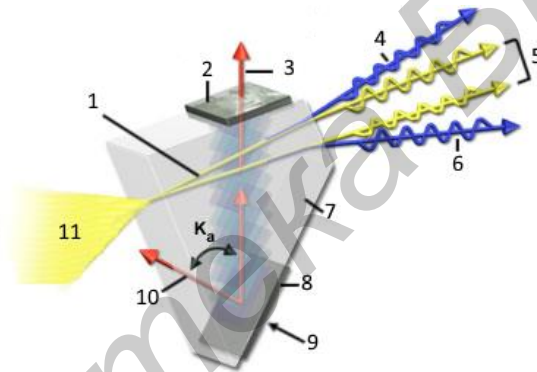


Рис. 1. Конфигурация неколлинеарного ПАОФ на диоксиде теллура:

- 1) Падающая необыкновенная волна, 2) Акустический поглотитель; 3) Оптическая ось; 4) Дифрагированный обыкновенный пучок 1-го порядка; 5) Недифрагированные пучки 0-го порядка; 6) Дифрагированный необыкновенный пучок 1-го порядка; 7) Кристалл  $\text{TeO}_2$ ; 8) Пьезопреобразователь; 9) ВЧ вход; 10) Угол наклона акустического столба.

Основной механизм, ответственный за акустооптическое взаимодействие называют упруго-оптическим эффектом. Периодические сжатия и разрежения во всем объеме кристалла проявляются в виде перераспределения показателя преломления, что и реализует дифракцию падающего света. Хотя функция ПАОФ аналогична дифракционной решетке, характер дифракции в фильтре отличается тем, что она происходит в объеме кристалла, а не на плоской поверхности, и в ограниченной полосе спектральных частот светового луча, которая определяется диапазоном частот подводимого ВЧ сигнала. В этом отношении ПАОФ выступает в роли полосового фильтра, нежели дифракционной решетки. Переменный характер ультразвуковой акустической волны приводит к формированию в кристалле дифракционной решетки Брэгга [1]. Для конкретной акустической частоты, только ограниченный диапазон спектральных частот удовлетворяет условию фазового согласования [5], что является условием возникновения дифракции. Перестраивая частоту радиосигнала, подводимого к ПП, мы изменяем центр спектральной полосы пропускания, согласно условий для поддержания фазового синхронизма. Длины дифрагированной волны изменяются в зависимости от частоты радиосигнала, приложенного к ПП. Центральная длина волны (1) в полосе пропускания определяется условием синхронизма по следующей формуле:

$$\lambda_{\text{центр}} = \frac{V \Delta n}{f} \quad (1)$$

Где:

$\lambda_{\text{центр}}$  – Центральная длина волны света в полосе пропускания,  
 $V$  – Скорость акустической волны в кристалле;  
 $\Delta n$  – Разность коэффициентов преломления «обыкновенного» и «необыкновенного» пучков;  
 $f$  – Частота акустической волны;

Амплитуда световых волн, дифрагированного пучка пропорциональна радиочастотной мощности, приложенной к кристаллу (7). Следовательно, изменение частоты и мощности ВЧ-сигнала обеспечивает механизм выбора длины волны и регуляции интенсивности света, отфильтрованной ПАОФ. При дальнейшем исследовании закономерностей функционирования фильтров было установлено, что разрешающая способность фильтра и его эффективность растут одновременно с увеличением длины акустооптического взаимодействия [6].

### Технические параметры ПАОФ

Спектральный диапазон - интервал световых длин волн, в котором фильтр может быть перестроен для выделения волны требуемой длиной с заданным разрешением, т.к. длина волны дифракции определяется частотой возбуждения, приложенной к акустическому преобразователю и результирующей частотой акустической волны. Центральная длина волны уменьшается с увеличением акустической частоты.

Диапазон перестройки частот акустической волны – диапазон ВЧ частот, подаваемых на ПП для генерации акустической волны той же частоты для формирования дифракционной решетки в объеме кристалла.

ПАОФ имеют ограничения в виде величины диапазона перестройки длины акустической волны с помощью ПП. Обычно, эта величина значительно меньше той, которую может обеспечить в оптическом диапазоне кристалл.

Спектральное разрешение ПАОФ определяется как полная ширина на половине максимума главного лепестка выбранного оптического выхода, и зависит как от длины волны, так и конфигурации кристалла. Спектральное разрешение типового ПАОФ колеблется от единиц до десятков нанометров для видимой и ближней инфракрасной областей спектра.

Эффективная линейная апертура ПАОФ ограничена высотой акустического луча в одном измерении и с помощью акустического ослабления поперек оптической апертуры (акустическое транзитное расстояние) в другом измерении. Акустическое затухание в кристаллических материалах, таких как диоксид теллура пропорциональна квадрату акустической частоты, и, следовательно, является весьма проблематичным ограничением

линейного размера апертуры в диапазоне длин волн короче видимого света, что требует более высоких частот ВЧ для настройки.

Мощность, подводимая к ПП – величина мощности, необходимая для формирования стоячей дифракционной решетки в объеме кристалла. Величина подводимой к ПП мощности является одной из наиболее важных расчетных величин. Установленной закономерностью является то, что эта величина возрастает с увеличением оптической апертуры и длин акустических волн. Высокий уровень мощности может вызвать тепловой дрейф и ухудшение стабильности параметров фильтра.

Полное сопротивление ПАОФ – величина входного сопротивления фильтра. Классическим вопросом разработки ПП является преобразование его сопротивления. Проблема заключается в том, что ПП является комплексной нагрузкой [7], т.е. полное сопротивление ПП определяется активной частью -  $Re$ , на которой и происходит рассеивание подводимой мощности, и реактивной –  $Im$ , которая, в свою очередь, может иметь емкостной либо индуктивный характер.

подавляющее число современных ВЧ генераторов имеет выходное сопротивление 50 Ом –  $Z = 50 - j0$ . Поэтому, для согласования источника и нагрузки рассчитываются цепи согласования, компенсирующие во всем частотном диапазоне мнимую составляющую комплексного импеданса ПП.

### Экспериментальная часть

На рисунке 2 представлен образец кристалла диоксида теллура с напыленным на него ПП из ниобата лития общей толщиной 11 мкм. Толщина, последовательность материалов подобрана таким образом, чтобы обеспечить рабочий диапазон 90-120 МГц.



Рис.2. Образец исследуемого пьезопреобразователя

Необходимо учитывать, что одним из важнейших условий правильного функционирования ПАОФ является уровень подводимой ВЧ мощности. Ее избыток может привести к разогреву кристалла парателлурита и возникновению явления спектрального дрейфа – уход величин оптических параметров фильтра. В тоже время, недостаток уровня подводимой мощности приводит к ухудшению качества акустического столба, что в свою очередь, также не позволит обеспечить требуемую дифракционную эффективность и спектральное разрешение. Необходимо также отметить, что также существует необходимость учитывать неравномерность коэффициента усиления выходного каскада блока управления ПАОФ. Все это в совокупности позволяет утверждать, что контроль уровня подводимой и отраженной мощности от ПП позволит повысить эффективность управления параметрами ПАОФ.

В ходе исследований выполнены измерения комплексного импеданса ПП (рисунок 3). Из представленных зависимостей видно, что для сопряжения с этого ПП с 50-омным выходом блока управления ПАОФ, необходимо наличие согласующей цепи. На рисунке 4 представлен коэффициент стоячей волны (КСВ) тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь». Применение пассивных согласующих цепей позволяет обеспечить достаточную степень согласования ( $КСВ \leq 2$ ) источника сигнала с нагрузкой. Применение относительно малых (по габариту) согласующих цепей не позволяет обеспечить хорошую равномерность КСВ в рабочей полосе частот.

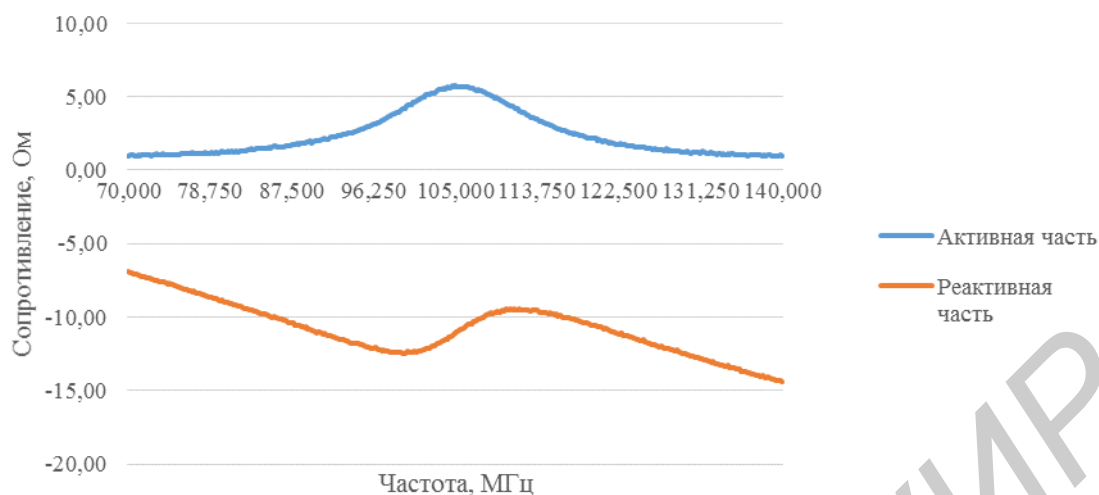


Рис. 3. Комплексный импеданс исследуемого пьезопреобразователя

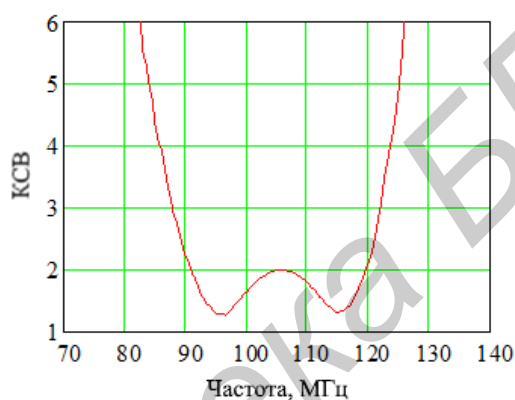


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь»

### Структурная схема аппаратной части системы

Анализ существующих блоков управления ПАОФ показал, что зачастую данный блок представляет собой генератор ВЧ- мощности требуемого диапазона. Для контроля уровня подводимой и отраженной мощности предложено дополнить структуру блока управления блоком оценки согласования. Необходимость этого обусловлена тем, что в процессе работы из-за разогрева кристалла возможен уход параметров акустического согласования, и, как следствие, параметров электрического согласования. Обеспечение контроля температуры кристалла в совокупности с контролем уровня согласования позволит также в режиме реального времени управлять уровнем подводимой мощности, что позволит повысить эффективность работы фильтра на граничных частотах рабочего диапазона при возрастающем рассогласовании. Структура блока оценки согласования представлена на рисунке 5.

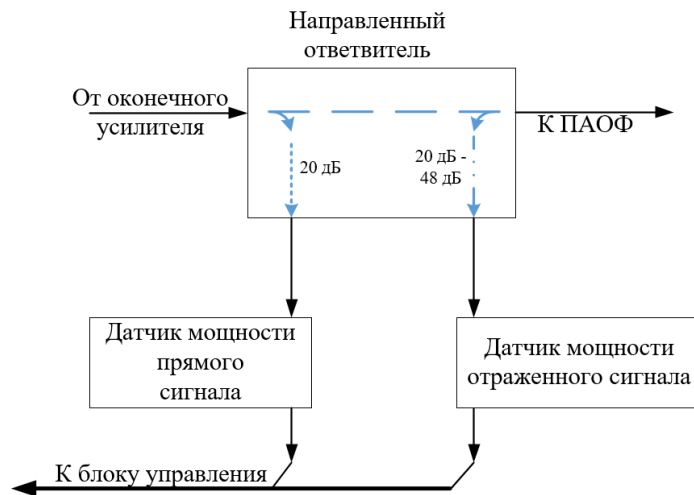


Рис. 5. Структура блока оценки согласования

В состав блока входят:

Двунаправленный ответвитель – устройство, обеспечивающее прохождение сигнала от источника к нагрузке с минимальным ослаблением (и отводом части энергии для измерения) и возможностью ответвления отраженного сигнала от нагрузки.

Датчики мощности – позволяют оценить, как реальный уровень передаваемой к нагрузке мощности, так и величину мощности отраженного сигнала.

Применение микропроцессора в составе блока управления ПАОФ позволяет пересчитывать данные от датчиков мощности в величины мощности прямого и отраженного сигналов и вводить коррекцию не только для уровней мощности необходимых для эффективной дифракции, но и для компенсации неравномерности коэффициента передачи ВЧ-тракта блока управления ПАОФ.

### Заключение

Основываясь на полученных результатов экспериментальных исследований, а так же с учетом с учетом степени согласования тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь» обобщенная методика управления параметрами ПАОФ состоит из следующих этапов:

1. Инициализация и первоначальная настройка блока управления;
2. Определение частоты управляющего ВЧ сигнала;
3. Определение расчетной величины мощности управляющего ВЧ сигнала;
4. Расчет поправочных коэффициентов для канала усиления для данной частоты управляющего сигнала;
5. Формирование управляющего сигнала;
6. Контроль степени согласования;
7. Контроль температуры кристалла
8. Коррекция уровня мощности с учетом степени согласования и температуры;

Методика важна для тех случаев, когда рабочая полоса ПАОФ может превышать одну октаву, т.к. в этом случае возможна работа при значениях КСВ более 2, что приводит к увеличению отраженной мощности, что может негативно сказаться на выходе задающего генератора.

### Список литературы

- [1] Narasimha S.Pasad J. Deep-UV based acousto-optic tunable filter for spectral sensing applications [Электронный ресурс] режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060046594>. Дата доступа: 20.11.17

- [2] Вартанов, А.З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг/: А.З. Вартанов, В.Л. Шкуратник, А.Д. Рубан; – Москва, Горная книга, 2009. – 647с.
- [3] Балакший, В. И. Физические основы акустооптики/ В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. И. Чирков; – Москва; Радио и связь, 1985. – 278 с.
- [4] Залесский, В. В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей/ В. В. Залесский; Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1971. – 152с.
- [5] Анчуткин, В.С. Акустооптический метод спектрально-поляризационного анализа изображений / В.С. Анчуткин// Прикладная физика – 2010. – №1 С.14 – 16.
- [6] Левин, В.М. Свет и звук: взаимодействие в среде/ В.М. Левин; – Москва: Знание, 1981. – 64 с.
- [7] Шакин, О. В. Методы инженерного расчета схемы электрического согласования акустооптического модулятора/ О. В. Шакин// Информационно-управляющие системы – 2013. – № 5. – С. 23 – 25.

### References

- [1] Narasimha S.Pasad J. Deep-UV based acousto-optic tunable filter for spectral sensing applications [Electronic resource] access mode: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060046594>. access date: 20.11.17
- [2] Vartanov, A.Z. Metody i pribory kontrolja okruzhajushhej sredy i jekologicheskij monitoring/: A.Z. Vartanov, V.L. Shkuratnik, A.D. Ruban; – Moskva, Gornaja kniga, 2009. – 647s.
- [3] Balakshij, V. I. Fizicheskie osnovy akustooptiki/ V. I. Balakshij, V. N. Parygin, L. I. Chirkov; – Moskva; Radio i svjaz', 1985. – 278 s.
- [4] Zalesskij, V. V. Analiz i sintez p'ezojelektricheskikh preobrazovatelej/ V. V. Zalesskij; Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostovskogo un-ta, 1971. – 152s.
- [5] Anchutkin, V.S. Akustoopticheskij metod spektral'no-poljarizacionnogo analiza izobrazhenij / V.S. Anchutkin// Prikladnaja fizika – 2010. – №1 S.14 – 16.
- [6] Levin, V.M. Svet i zvuk: vzaimodejstvie v srede/ V.M. Levin; – Moskva: Znanie, 1981. – 64 с.
- [7] Shakin, O. V. Metody inzhenernogo rascheta shemy jelektricheskogo soglasovaniya akustoopticheskogo moduljatora/ O. V. Shakin// Informacionno-upravljajushhie sistemy – 2013. – № 5. – S. 23 – 25.

#### Сведения об авторах

Мальцев О.С., м.т.н., инженер Центра 1.6 НИЧ БГУИР.  
 Давыдов М.В., к.т.н., доцент, зав.каф. ТОЭ БГУИР  
 Федоринчик М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры ИРТ БГУИР.

#### Information about the authors

Maltsev O.S. master of science, engineer Center 1.6 RDU BSUIR  
 Davydov M.V., PhD, associate professor, Head of department «Fundamental Electrical Engineering»  
 Fedorinchik M.P. PhD, associate professor, associate professor of department «Information Radiotechnologies»

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, Минск, П.Бровки, 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, +375(33) 3580857.  
 e-mail: maltsev@bsuir.by  
 Мальцев Олег Сергеевич

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki, 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics, +375(33) 3580857.  
 e-mail: maltsev@bsuir.by  
 Maltsev Oleg Sergeevich