

УДК 621.317.7:621.37/39  
DOI: 10.15827/0236-235X.108.150-154

Дата подачи статьи: 13.12.2013

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

С.С. Шибает, к.т.н., старший научный сотрудник, sheab@list.ru;

А.В. Помазанов, к.т.н., профессор, pav\_tsure@mail.ru;

Д.П. Волик, соискатель, dvlbest@mail.ru

(Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета,  
Некрасовский пер., 44, г. Таганрог, 347928, Россия)

В акустооптических процессорах, назначением которых является в основном измерение параметров радиочастотных сигналов, вся необходимая информация о сигнале и его параметрах содержится в аналоговом световом Фурье-распределении в плоскости анализа, в которой с целью дальнейшей обработки устанавливается либо ПЗС-фотоприемник, либо линейка фотодиодов, сигнал с которых в виде распределения амплитуд световой интенсивности оцифровывается бортовыми средствами. Обработка такого цифрового сигнала полностью либо частично возлагается на внешнюю вычислительную систему – персональный компьютер. В таких условиях значительную роль играет специализированное программное обеспечение, которое не только несет нагрузку по извлечению полезной информации из потока принимаемых данных, но и выполняет ряд сервисных функций.

В работе рассмотрены структура и возможности приложения для наиболее распространенного класса акустооптических процессоров – измерителя частоты радиосигнала. В программе реализованы функции считывания и отображения амплитудного распределения в режиме реального времени, функция ручного и автоматического измерения частоты сигнала. С ее помощью выполняется несколько видов калибровки, начиная от компенсации темнового фона и заканчивая учетом нелинейности частотной шкалы. Имеется возможность сохранения полученных распределений в виде файлов с целью их последующего анализа в таких известных программных продуктах, как MathCad, MatLab и др. Приложение предоставляет возможность управления внешним лабораторным оборудованием при помощи интерфейса Ethernet, в частности, генераторами Agilent или других фирм, что позволяет перед эксплуатацией измерителя в автоматическом режиме протестировать его характеристики и учесть эти результаты при калибровке прибора.

**Ключевые слова:** акустооптический, процессор, приложение, анализатор спектра, амплитудное распределение, калибровка, частота, нелинейность, кривая настройки, алгоритм.

Под акустооптическим процессором (АОП) понимается устройство радиотехнического назначения, в котором основная роль по обработке радиосигнала отводится оптической части, где опорный световой пучок лазера, взаимодействуя с акустическим аналогом сигнала, формирует в плоскости анализа спектральное пространственное распределение. В этой плоскости устанавливается многоэлементный фотоприемник, с выхода которого снимается дискретизованное распределение световой интенсивности. В последующих цепях *распределение интенсивности светового сигнала* (РИСС) оцифровывается и подвергается дальнейшей обработке – частично на борту АОП, частично во внешней вычислительной системе, например, на персональном компьютере. Основными видами АОП являются *акустооптические измерители частоты* (АОИЧ), анализаторы спектра, фазометры. С примерами реализации подобных устройств можно ознакомиться в [1–4].

Принцип действия АОИЧ основан на использовании имеющего место соответствия между частотой подаваемого на его вход радиосигнала и пространственным положением на фотоприемнике продифрагмированного в дефлекторе АОИЧ светового сигнала. Ценное для практического использования свойство АОИЧ состоит в том, что существуют такие частоты входного сигнала, которые взаимно-однозначно соответствуют пространственным положениям средин  $x_k$   $k$ -х фотодиодов. Оно проявляется в том, что при подаче на вход АОИЧ сигнала с частотой  $f_k$  в точке  $x_k$  (или, что одно и то же, на выходе  $k$ -го фотодиода) регистрируется максимальный сигнал. При симметричной форме РИСС максимум светового сигнала расположен на его оси симметрии.

Частоты  $f_k$ , соответствующие  $k$ -м фотодиодам, можно рассматривать как упомянутые опорные значения измеряемого параметра или (в данном случае) опорные значения частот. Эти частоты называют частотами точной настройки фотодиодов, а их упорядоченную последовательность – *кривой настройки* (КН) АОИЧ.

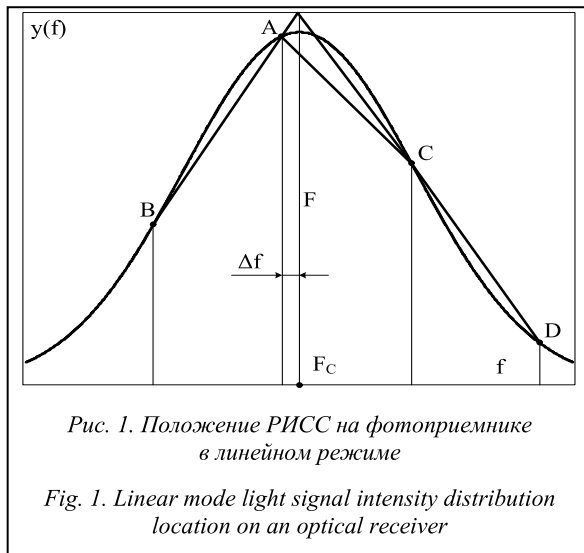
Распределение света изменяет свое положение (местонахождение) на фотоприемнике в зависимости от частоты, поэтому определение положения РИСС на фотоприемнике, в частности, нахождение абсциссы его оси симметрии (в случае симметричного РИСС), равносильно измерению частоты. Рассмотрим кратко алгоритмы решения подобных задач [5].

Первый из них применяется в линейном режиме работы фотоприемника и производит оценку частоты как абсциссы точки пересечения двух прямых.

Для реализации алгоритма должны быть известны частоты точной настройки четырех *фотодиодов* (ФД), расположенных вблизи оси симметрии РИСС, и уровни сигналов на этих ФД.

На рисунке 1 в координатах частота–уровень  $y(f)$  показаны положения РИСС на фотоприемнике. Абсциссы точек А, В, С, D соответствуют частотам точной настройки ФД фотоприемника, а ординаты этих точек равны уровням сигналов на ФД. Частотный интервал  $\Delta F$  между абсциссами точек В и А, А и С, С и D одинаков; ВАСD – аппроксимация РИСС линейно-ломаной.

Считается, что РИСС, формируемые на фотоприемнике, симметричны относительно оси F. Абсцисса этой оси равна частоте  $F_c$  сигнала. Для удобства рассмотрения примем  $F_c$  равной нулю. При таком выборе абсцисса точки А (частота  $f_A$  на рис. 1) может



быть представлена в виде  $f_A = -\Delta f$ , где  $\Delta f$  – частотный интервал между абсциссами оси F и точки A.

Рассмотрим в качестве примера гауссово РИСС вида  $y(f) = \exp(-\alpha f^2)$ , (1) где  $\alpha$  – коэффициент формы гауссоиды.

Для РИСС (1) координаты точек A, B, C и D могут быть записаны в форме:  $A(f_A, y_A)$ ,  $B(f_B, y_B)$ ,  $C(f_C, y_C)$ ,  $D(f_D, y_D)$ , где  $f_A = -\Delta f$ ,  $y_A = \exp(-\alpha f_A^2)$ ,  $f_B = -(\Delta f + \Delta F)$ ,  $y_B = \exp(-\alpha f_B^2)$ ,  $f_C = \Delta F - \Delta f$ ,  $y_C = \exp(-\alpha f_C^2)$ ,  $f_D = 2\Delta F - \Delta f$ ,  $y_D = \exp(-\alpha f_D^2)$ .

Найдем абсциссу  $f_0$  точки пересечения прямых BA и DC. Она вычисляется [6] по формуле

$$f_0 = (c_1 - c_2)/(g_2 - g_1), \quad (2)$$

где  $g_1$  и  $g_2$  – угловые коэффициенты, а  $c_1$  и  $c_2$  – свободные члены в уравнениях упомянутых прямых:

$$y = g_1 f + c_1; y = g_2 f + c_2. \quad (3)$$

Определяя входящие в (3) угловые коэффициенты и свободные члены [5], можно получить выражение для  $f_0$ :

$$f_0 = -\Delta f - \Delta F \left( 2 \exp(2\alpha \Delta f \Delta F) \exp(-\alpha \Delta F^2) - \exp(4\alpha \Delta f \Delta F) \exp(-4\alpha \Delta F^2) - 1 \right) / Z, \quad (4)$$

$$\text{где } Z = \exp(4\alpha \Delta f \Delta F) \exp(-4\alpha \Delta F^2) - \exp(-\alpha \Delta F^2) \left[ \exp(2\alpha \Delta f \Delta F) - \exp(-2\alpha \Delta f \Delta F) \right] - 1, \quad (5)$$

$$\Delta F = f_A - f_B = f_D - f_C.$$

Абсцисса  $f_0$  может быть принята за оценку частоты  $F_C$  сигнала, а методическая погрешность вычисления частоты  $\delta f$  составит величину  $\delta f = F_C - f_0$ .

Следующий алгоритм подходит как для линейного режима, так и для режима насыщения фотоприемника. На рисунке 2 в координатах частота–уровень показаны РИСС на ФД в режиме ограничения (насыщения ФД). Частотный интервал RS соответствует насыщению, регистрируемому ФД.

Как и в предыдущем случае, абсциссы точек A, B, C, D соответствуют известным частотам настройки ФД ( $f_A, f_B, f_C, f_D$ ), а ординаты этих точек равны измеренным уровням сигналов на ФД ( $y_A, y_B, y_C, y_D$ ).

Частотный интервал между ФД одинаков и равен  $\Delta F$ . На выходах ФД в интервале RS, находящихся в насыщении, сигнал максимален (ограничен). Считается, что РИСС симметрично относительно оси F; его абсцисса равна частоте  $F_C$ , которую, как и прежде, примем равной нулю.

Идея метода вычисления частоты состоит (рис. 2) в определении положения на оси частот абсцисс точек C и G (то есть  $f_C$  и  $f_G$ ). При этом оценка  $f_0$  частоты  $F_C$  будет определяться выражением

$$f_0 = (f_C + f_G)/2. \quad (6)$$

Будем полагать также, что частота  $f_C$  известна, а точка G лежит на прямой AB. Абсциссу  $f_G$  можно вычислить как

$$f_G = f_A - \Delta f, \quad (7)$$

где  $\Delta f = \Delta F(y_A - y_C)/(y_A - y_B)$ .

Таким образом, искомая оценка положения оси симметрии РИСС

$$f_0 = (f_C + f_A - \Delta f)/2. \quad (8)$$

Отметим, что описанная методика вычисления частоты справедлива и для гауссового, и для негауссового РИСС.

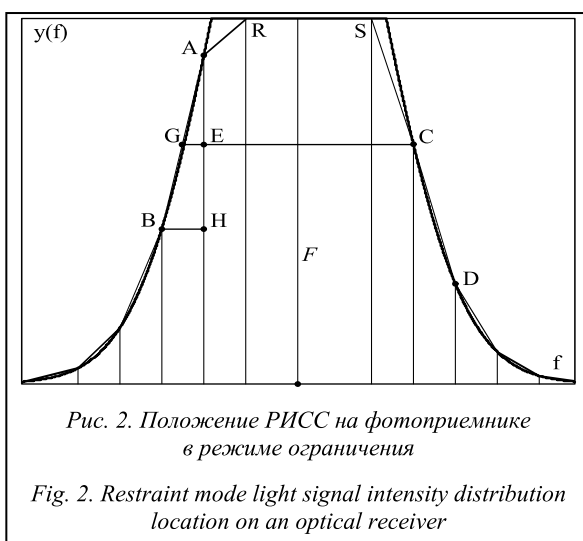
При использовании в АОИЧ описанных алгоритмов [5] можно существенно снизить погрешность измерения частоты по сравнению с простейшим случаем, когда в РИСС определяются номера первого  $m$  и последнего  $n$  ФД из группы засвеченных, которая задается соотношением

$$f_0 = f_1 + \Delta F(m+n)/2 = f_1 + \Delta f_\Sigma(m+n)/2N_\Sigma, \quad (9)$$

где  $f_1$  – нижняя граничная частота полосы пропускания  $\Delta f_\Sigma$  АОИЧ;  $N_\Sigma$  – число ФД в ПЗС-фотолинейке [7]. Хотя погрешность единичного измерения данного простого алгоритма составляет половину частотной дискретности  $\Delta F$ , этот способ также имеет право на существование, когда РИСС близко к симметричному и требуется повышенное быстродействие.

Коснемся методик снижения инструментальных погрешностей, связанных с нелинейностью кривой настройки [8].

В качестве фотоприемников в современных АОИЧ используют линейки ПЗС [1, 2], фотодиодные линейки [1, 3] и матрицы. Во всех этих устройствах



фотодиоды распределены эквидистантно по пространственной координате (длине) фотоприемника. В связи с этим зависимость между порядковым номером  $k$  ФД и положением его центра  $x_k$  на оси  $x$  может быть представлена арифметической прогрессией  $x_k = x_0 + k\delta_x$  ( $0 \leq k \leq n-1$ ), где  $x_0$  – пространственное положение середины ФД с нулевым номером;  $\delta_x$  – интервал между положениями середин соседних ФД фотоприемника (шаг фотодиодов);  $n$  – количество ФД фотоприемника.

Нелинейность кривой настройки проявляется в том, что частотные интервалы между частотами настройки соседних ФД различны на различных участках частотного диапазона приемника-частотомера. Различия не учитываются в формулах вычисления частот настройки ФД, поскольку эти формулы по умолчанию линейны. В результате частоты настройки ФД определяются с погрешностями и, как следствие, частота сигнала, в формулах вычисления которой используются частоты настройки ФД, тоже вычисляется с погрешностью.

Нелинейность реальной КН в АОИЧ, как показывает анализ, объясняется следующими основными причинами.

1. Нелинейный характер зависимости угла дифракции –  $\theta_d$  от частоты  $f$ , которая для изотропного варианта применяемого в АОИЧ дефлектора отображается в виде  $\theta_d = \arcsin(\lambda f / V)$ , где  $\lambda$  – длина волны света лазера;  $V$  – скорость ультразвука. Данный вид нелинейности проявляется тем больше, чем шире полоса частот измерителя.

2. Аберрации входящего в состав АОИЧ Фурье-объектива с фокусным расстоянием  $F$ , которое в параксиальном приближении выбирается из условия  $F = LV/\lambda\Delta f$ , где  $\Delta f$  – полоса рабочих частот АОИЧ;  $L$  – протяженность линейки ФД. При этом погрешность Фурье-преобразования [9] увеличивается с ростом  $\Delta f$  и  $L$ .

3. Погрешности, связанные с неэквидистантностью расположения диодов в фотолинейках и матрицах, неоднородностью распределения чувствительности как отдельных ФД, так и по поверхности их фотоплощадок.

4. Погрешности, связанные с конечной шириной линии излучения лазерного (полупроводникового) источника, асимметрией ее формы, а также с наличием в спектре излучения паразитных составляющих, уровень которых, как правило, изготовителями не регламентируется.

Существуют два способа устранения или уменьшения рассматриваемой инструментальной погрешности, связанной с нелинейностью КН. Это линейаризация существующей КН аппаратными средствами и замена реальной КН некой приближенной (аппроксимированной) КН. Рассмотрение первого способа выходит за рамки настоящей статьи, а второй может быть реализован алгоритмически. Суть алгоритмического способа сводится к следующему:

- измеряют реальную КН ФД АОПЧ, при этом номера ФД, для которых измеряют частоты точной настройки, выбирают с некоторым шагом, в общем случае неравномерным;

- аппроксимируют реальную КН подходящей математической зависимостью и в результате получают приближенную (аппроксимированную) КН;

- используют полученную КН для вычисления приближенной частоты настройки любого ФД фотоприемника;

- приближенные частоты настройки ФД используют в алгоритмах вычисления частоты сигнала.

Эффективность изложенного алгоритмического способа уменьшения инструментальной погрешности в случае аппроксимации КН степенным полиномом [10] по методу наименьших квадратов была проверена экспериментально [8] на макете АОИЧ, описанном в работе [2].

Другая разновидность метода, а именно замена КН отрезками прямых (линейно-ломаной), также показала свою эффективность. Суть метода сводится к следующему. Вся кривая настройки в диапазоне частот АОИЧ равномерно разбивается узлами аппроксимации (например, опорными сигналами) на  $(R-1)$  участок. Всего узлов аппроксимации (или опорных сигналов)  $R$ , и каждый из них (за исключением крайних) является общей точкой и для кривой настройки, и для двух соседних аппроксимирующих отрезков прямой. Очевидно, что в узлах погрешность нулевая.

Для каждого  $j$ -го узла аппроксимации (где  $1 \leq j \leq R$ ) при помощи одного из описанных ранее алгоритмов находят номера ФД  $k_j$ , которые в общем случае являются нецелыми величинами, так как узловые (опорные) частоты  $f_j$  необязательно совпадают с частотами настройки (центры РИСС на этих частотах в основном приходятся не на центры ФД).

Интервалы по частотной оси между соседними узлами аппроксимации могут быть неодинаковыми. Они могут выбираться так, чтобы в пределах  $j$ -го интервала нелинейную кривую настройки можно было бы линейаризовать с требуемой частотной погрешностью.

После линейаризации всех участков кривой настройки частотные интервалы  $\Delta f_j$  между соседними ФД считаются постоянными, а значит, в пределах  $j$ -го интервала, то есть в полосе частот  $f_j \dots f_{j+1}$ , можно пользоваться линейной формулой  $f_{k_j} = f_j + \Delta f_j(k_{j+1} - k_j)$ , обеспечивающей, если пренебречь погрешностями линейаризации, точное вычисление частот  $f$ .

Очевидно, что точность измерения частоты в рассматриваемом случае выше, поскольку в результатах измерений снижены погрешности, связанные с нелинейностью кривой настройки. Подробное рассмотрение данного алгоритма показывает, что для снижения  $\delta f$  на порядок по сравнению с аппроксимацией КН обычной прямой ( $R=2$ ) достаточно 5-6 узловых точек. Расчетный график погрешностей стремится к нулю при устремлении  $R$  к бесконечности.

Рассмотрим теперь разработанное приложение для управления АОИЧ, его калибровки, вычисления частоты, в том числе и с учетом описанных выше алгоритмов, а также выполнения различных сервисных функций.

Окно приложения приведено на рисунке 3.

Основную площадь окна занимает графическая область, в которой в режиме реального времени ото-

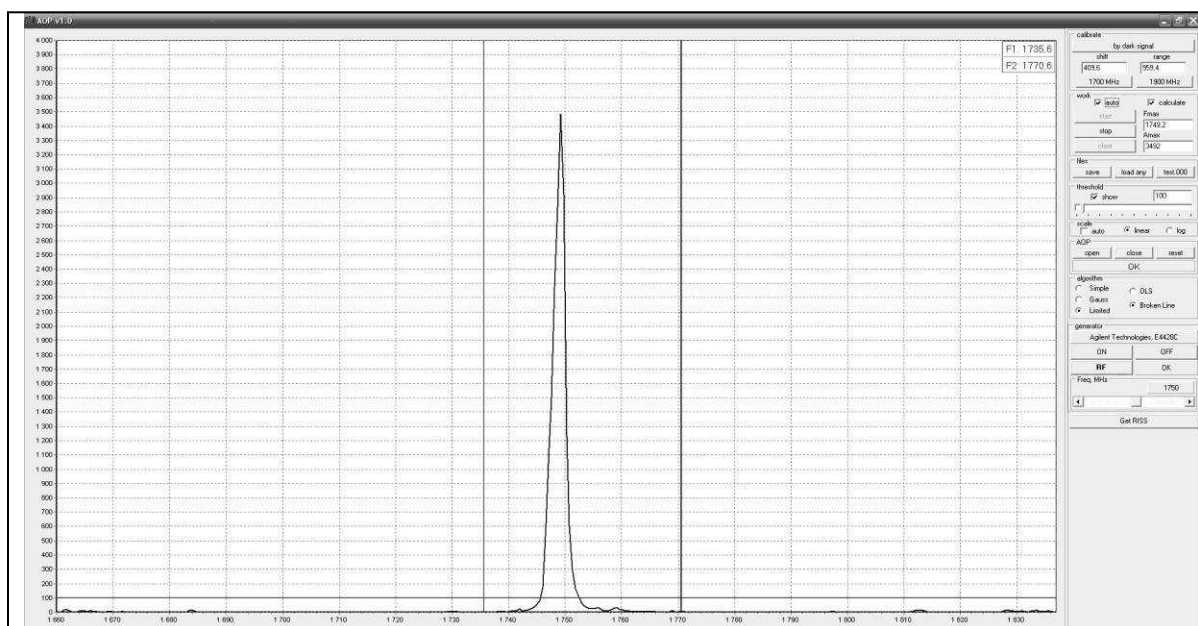


Рис. 3. Окно программы для работы с АОИЧ

Fig. 3. Program window to work with frequency acoustooptic measurer

бражаются цифровые РИСС, являющиеся аналогом спектра обрабатываемого радиосигнала. Вертикальная (амплитудная) ось графика представлена значениями 12-разрядного кода аналого-цифрового преобразования сигнала с фотоприемника. Горизонтальная шкала отображает значения частоты (в МГц). В области графика имеются также два маркера для проведения наблюдений и измерений в ручном режиме. Значения частотного положения маркеров отображаются в правом верхнем углу графика с точностью 0,1 МГц. Обеспечены также масштабирование и панорамирование графика при помощи компьютерной мыши. В правой части приложения располагаются элементы управления, для удобства разбитые на группы. Рассмотрим их подробнее.

Группа *calibrate* позволяет, во-первых, реализовать алгоритм компенсации темнового фона, вызванного в основном засветкой фотоприемника рассеянным в оптических элементах АОИЧ светом, а во-вторых, нейтрализовать смещение частотной шкалы при помощи бигармонического сигнала от внешнего либо внутреннего источника. Частотное смещение обусловлено в основном температурной зависимостью длины волны полупроводникового лазера и механическими деформациями конструктивных элементов оптической системы.

Группа *work* обеспечивает прием и отображение спектрального распределения во всей полосе анализа в одиночном и циклическом режимах. Переключатель *calculate* обеспечивает автоматическое измерение несущей частоты и амплитуды сигнала в максимуме распределения. Вычисление частоты может выполняться на выбор в соответствии с одним из описанных алгоритмов согласно выражениям (4), (8) или (9).

При помощи группы *files* можно сохранять текущее распределение в текстовый файл в виде вектора

столбца и затем использовать его для независимого анализа в таких программных продуктах, как MathCAD, MatLab, Excel и др. Имеется также возможность открытия и отображения на графике любого из ранее сохраненных распределений.

Группа *threshold* управляет горизонтальной линией порога по любому заданному уровню, а *scale* задает линейный либо логарифмический масштаб вертикальной оси графика, а также поддерживает его верхнюю границу плавающей в зависимости от амплитуды на максимуме текущего распределения.

АОР служит для управления USB контроллером АОП – его подключением, отключением или сбросом в случае неполадок.

Группа *algorithm* предназначена для выбора алгоритма вычисления частоты из набора: *Simple* – выражение (9), *Gauss* – выражение (4) или *Limited* – выражение (8). Также группа позволяет выбирать вид аппроксимации частотной шкалы: полином четвертой степени по методу наименьших квадратов – *Ordinary least squares (OLS)* или ломаная – *Broken Line*. Кнопка *Get RISS* обеспечивает сбор необходимых для аппроксимации данных в виде 101 распределения во всей полосе частот и проведение соответствующих вычислений.

Наконец, группа *generator* обеспечивает по Ethernet-интерфейсу с использованием библиотеки Visa (обмена данными между ПК и стандартным лабораторным оборудованием) доступ и управление лабораторным генератором СВЧ-сигналов, в качестве которого в нашем случае использован прибор E4428C компании «Agilent Technologies» [11].

Рассмотренный пример позволяет утверждать, что разработка ПО для АОП является важной задачей, расширяющей и в полной мере использующей функциональные возможности акустооптических измерителей.

## Литература

1. Роздобудько В.В. Широкополосные акустооптические измерители частотных и фазовых параметров радиосигналов // Радиотехника. 2001. № 1. С. 79–92.
2. Роздобудько В.В., Пелипенко М.И. Быстродействующий измеритель параметров СВЧ радиосигналов // Специальная техника. 2006. № 1. С. 28–36.
3. Роздобудько В.В., Дикарев Б.Д. Высокоточный акустооптический приемник-частотомер комбинированного типа // Радиотехника. 2003. № 9. С. 31–36.
4. Задорин А.С., Шандаров С.М., Шарангович С.Н. Акустические и акустооптические свойства монокристаллов. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. 152 с.
5. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Алгоритмы вычисления частоты в акустооптических измерителях параметров радиосигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2008. № 4. С. 38–46.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 832 с.
7. Grossman S.B., Emmons R.B. Performance analysis and size optimization of focal planes for point-source tracking algorithm applications. *Opt. Engineering*, 1984, vol. 3, no. 2; DOI: 10.1117/12.7973407.
8. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Алгоритмический способ уменьшения погрешностей в акустооптических измерителях // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2011. № 5. С. 51–56.
9. Роздобудько В.В., Крутинский Г.С. Погрешности Фурье-преобразования в акустооптических измерителях параметров радиосигналов // Радиоэлектроника. 1998. № 1. С. 50–56.
10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1965. 701 с.
11. Agilent Technologies URL: <http://www.agilent.com> (дата обращения: 16.11.2013).

DOI: 10.15827/0236-235X.108.150-154

Received 13.12.2013

## SOFTWARE FOR ACOUSTOOPTIC PROCESSORS

Shibaev S.S., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, [sheab@list.ru](mailto:sheab@list.ru);Pomazanov A.V., Ph.D. (Engineering), Professor, [pav\\_tsure@mail.ru](mailto:pav_tsure@mail.ru);Volik D.P., Candidate, [dvlbest@mail.ru](mailto:dvlbest@mail.ru) (Academy of Engineering and Technology Southern Federal University, Nekrasovskiy lane 44, Taganrog, 347928, Russian Federation)

**Abstract.** The main purpose of acoustooptic processors which is measuring radiosignals parameters. All necessary information about the signal and its parameters is enclosed in analog light Fourier distribution in analysis plane, where there is either CCD photo receiver or a photo diodes line, signal from which is then digitized with onboard means in the form of light intensity amplitudes distribution. The processing such digital signal is fully or partially entrusted to outer calculating system – a personal computer. Under such conditions special software is really important. It extracts useful information out of received data stream, as well as has servicing functions.

The paper considers the application structure and capabilities for the most popular class of acoustooptic processors – radiosignals frequency measurer. The program has the function of real-time reading and displaying amplitude distribution, the function of manual and automatic measuring signal frequency. It helps to carry out a few types of calibration from background noise compensation to finishing with frequency scale nonlinearity account. There is also a possibility to save received distributions into files for their further analysis in such well known programs as MathCad, MatLab etc. The application allows controlling exterior laboratory equipment using Ethernet interface, particularly the Agilent generator or other firms. That allows testing its characteristics and taking them into account at device calibration before measurer working automatically.

**Keywords:** acoustooptic, processor, application, spectrum analyzer, amplitude distribution, calibration, frequency, nonlinearity, adjustment curve, algorithm.

## References

1. Rozdobudko V.V. Wide-range acoustooptic measurers for frequency and phase radiosignal parameters. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2001, no. 1, pp. 79–92 (in Russ.).
2. Rozdobudko V.V., Pelipenko M.I. Quick-operating measurer for ultra-high frequency radio signals parameters. *Spetsialnaya tekhnika* [Special Technics]. 2006, no. 1, pp. 28–36 (in Russ.).
3. Rozdobudko V.V., Dikarev B.D. Highly-accurate combined type acoustooptic receiver-frequency indicator. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2003, no. 9, pp. 31–36 (in Russ.).
4. Zadorin A.S., Shandarov S.M., Sharangovich S.N. *Akusticheskie i akustoopticheskie svoystva monokristallov* [Acoustic and Acoustooptic Features of Monocrystals]. Tomsk, Tomsk. Univ. Publ., 1987, 152 p.
5. Volfovsky B.N., Shibaev S.S., Rozdobudko V.V. Frequency calculation algorithms in acoustooptic radiosignal parameters measurers. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeny Rossii. Radioelektronika* [News of Russian Universities. Radioelectronics]. 2008, no. 4, pp. 38–46 (in Russ.).
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematics Guide for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 832 p.
7. Grossman S.B., Emmons R.B. Performance analysis and size optimization of focal planes for point-source tracking algorithm applications. *Opt. Engineering*. 1984, vol. 3, no. 2.
8. Volfovskiy B.N., Shibaev S.S., Rozdobudko V.V. Algorithmic method for decreasing errors in acoustooptic measurers. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeny Rossii. Radioelektronika* [News of Russian Universities. Radioelectronics]. 2011, no. 5, pp. 51–56 (in Russ.).
9. Rozdobudko V.V., Krutichinsky G.S. Fourier transform errors in radiosignals parameters acoustooptic measurers. *Radioelektronika* [Radioelectronics]. 1998, no. 1, pp. 50–56 (in Russ.).
10. Ango A. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov* [Mathematics for Electroengineers and Radioengineers]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 701 p.
11. Agilent Technologies. Available at: <http://www.agilent.com> (accessed January 16, 2014).