

**ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ
АКУСТИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОВОЛН
MEASURING SYSTEMS AND INSTRUMENTS
BASED ON ACOUSTIC, OPTICAL AND RADIO WAVES**

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-2-53-61>

УДК 621.391(681.325:535)

Л. А. Аронов ✉, **В. Н. Ушаков**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КВАДРАТУРНЫХ КОМПОНЕНТ СПЕКТРА
В ГОМОДИННОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ**

Аннотация

Введение. Среди акустооптических спектроанализаторов с пространственным интегрированием схемы на основе оптических интерферометров обеспечивают наибольший динамический диапазон. При этом амплитудный спектр сигнала формируется на некоторой пространственной несущей, для устранения которой необходимо сформировать квадратурные компоненты. Двумерность преобразований, выполняемых в оптических процессорах, позволяет сделать это за счет считывания заряда дополнительных строк матричного фотоприемника. Известен метод, в котором данный подход реализован с использованием четырех строк, что в свою очередь определяет время получения оценки спектра сигнала.

Цель работы. Исследование возможности уменьшения времени получения оценки спектра.

Материалы и методы. Представлено описание двух методов формирования необходимых компонент. Первый метод задействует 3 строки фотоприемника, распределение заряда в которых имеет сдвиг по фазе пространственной несущей на 90° от строки к строке. Вторым методом основан на формировании необходимых распределений последовательно в трех циклах накопления за счет варьирования начальной фазы опорного сигнала. Математически показано, что трех распределений с относительным фазовым сдвигом на 90° достаточно для устранения пространственной несущей.

Результаты. Уменьшение времени анализа в первом методе несущественно, но параллельное формирование распределений позволяет не предъявлять дополнительных требований к спектру сигнала. Вторым методом за счет возможности использования для оценки любых трех последовательно формируемых распределений потенциально в 3 раза быстрее первого метода, но требует, чтобы спектр сигнала был стационарен в пределах трех циклов накопления. Он также может быть реализован с использованием линейного фотоприемника или фотоприемника с временной задержкой и накоплением и менее требователен к набору параметров оптической схемы.

Заключение. Предлагаемые методы формирования квадратурных компонент позволяют сократить время получения оценки спектра в интерференционных акустооптических спектроанализаторах, а также при необходимости упростить их реализацию.

Ключевые слова: гомодинный акустооптический спектроанализатор, интерференционный акустооптический спектроанализатор, квадратурный канал, интерферометр Юнга, двумерная оптическая обработка

Для цитирования: Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Метод формирования квадратурных компонент спектра в гомодинном акустооптическом спектроанализаторе // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 53–61. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-53-61

Источник финансирования. Инициативная работа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.02.2019; статья принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 24.04.2019

© Аронов Л. А., Ушаков В. Н., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Leonid A. Aronov✉, **Victor N. Ushakov**
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

QUADRATURE COMPONENTS FORMING METHOD FOR HOMODYNE ACOUSTO-OPTIC SPECTRUM ANALYZER

Abstract

Introduction. Among acousto-optic spectrum analyzers with spatial integration, schemes based on optical interferometers provide the largest dynamic range. Nevertheless, they form the signal amplitude spectrum on a certain spatial carrier. Formation of quadrature components can eliminate this spatial carrier. The two-dimensionality of the transformations performed in optical processors provides this elimination by reading of the additional charge of matrix photosensor lines. A renowned method implements this approach using four lines, which in turn determines the estimation time of the signal spectrum.

Objective. The objective of the work is to study the possibility of time reduction of the spectrum estimation.

Materials and methods. The paper presents the description of two methods of forming the necessary components. The first method uses three photosensor lines, the charge distribution in which has the spatial carrier phase-shifted by 90° from line to line. The second method forms the necessary distributions sequentially in three accumulation cycles by means of variation of the initial phase of the reference signal. By the mathematical proof, three distributions with a 90° relative phase shift are sufficient to eliminate the spatial carrier.

Results. In the first method, reduction of the spectrum estimation time is insignificant, but the parallel distributions formation affords not to impose additional requirements on the signal spectrum. The second method, due to the possibility of using any three sequentially formed distributions for estimation, is potentially three times faster than the first method, but requires the stationary signal spectrum within three accumulation cycles. Researchers can implement this method using a linear photosensor or TDI photosensor. In addition, the method is less demanding to optical scheme parameters.

Conclusion. The proposed quadrature components formation methods provide time reduction of the spectrum estimation in interference acousto-optic spectrum analyzers and simplify their design.

Key words: homodyne acousto-optic spectrum analyzer, interferometric acousto-optic spectrum analyzer, quadrature channel, Young's interferometer, two-dimensional optical processing

For citation: Aronov L. A., Ushakov V. N. Quadrature Components Forming Method for Homodyne Acousto-Optic Spectrum Analyzer. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 2, pp. 53–61. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-53-61 (In Russ.)

Source of financing. Initiative work.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Received 19.02.2019; accepted 18.03.2019; published online 24.04.2019

Введение. Спектральный анализ на основе явления акустооптического взаимодействия и пространственного преобразования Фурье характеризуется широкой полосой анализа [1], что представляет интерес при решении задач радиомониторинга, радиоэлектронной борьбы, а также в устройствах обнаружения сигналов. Алгоритм работы простых схем акустооптических спектроанализаторов с пространственным интегрированием (АОСПИ) [1]–[4] позволяет формировать только спектр мощности, что приводит к существенному снижению динамического диапазона. Схемы на основе оптических интерферометров [5]–[7], в которых осуществляется оптическое ге-

теродинирование, позволяют существенно – в 2 раза при измерении в децибелах [6] – повысить динамический диапазон устройства в сравнении с простыми АОСПИ. В [5]–[7] рассмотрены и практически подтверждены алгоритмы оптического гетеродинирования с переносом на нулевую частоту – гомодинирования – за счет введения в опорном оптическом канале необходимой модуляции света. Но в этих работах не учтена необходимость исключения влияния пространственной несущей.

С появлением фотоприемников с накоплением, обладающих широким динамическим диапазоном, предложена реализация гетеродинной схемы с матричным фотоприемником на основе ПЗС [8], что

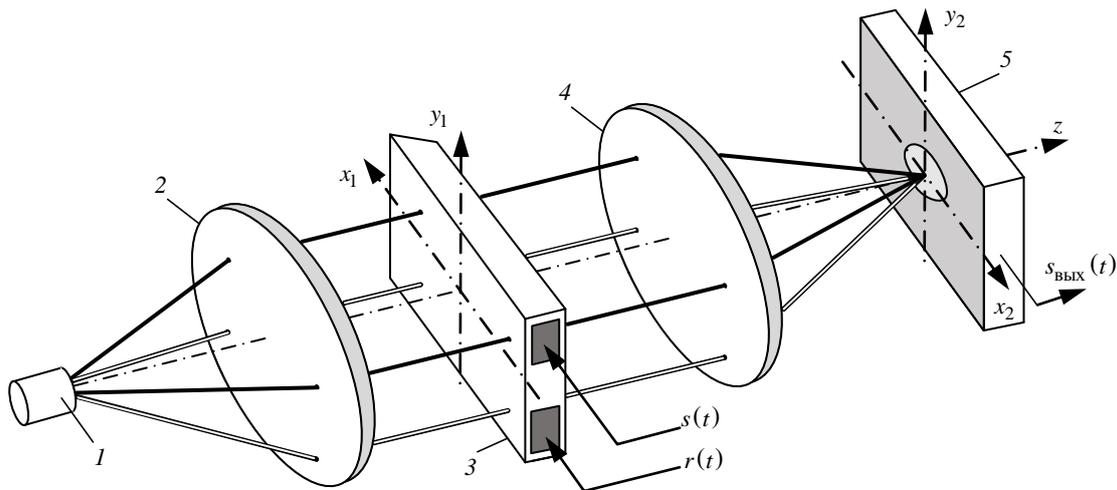


Рис. 1. Схема гомодинного акустооптического спектроанализатора на основе интерферометра Юнга
 Fig. 1. The scheme of the homodyne acousto-optic spectrum analyzer based Young interferometer

существенно упростило конструкцию устройства, а также позволило обеспечить более высокое разрешение по частоте. В [9] рассмотрен метод устранения влияния пространственной несущей, основанный на использовании четырех строк матричного фотоприемника. Однако считывание дополнительных строк увеличивает время, затрачиваемое на получение оценки спектра входного сигнала.

В настоящей статье представлена модификация этого метода, которая позволяет выделить амплитудный спектр анализируемого сигнала на основе считывания трех строк. Кроме того, предложен вариант его реализации с использованием линейного фотоприемника или фотоприемника с временной задержкой и накоплением и последовательным считыванием распределений заряда.

Уменьшение количества считываемых распределений позволяет сократить время формирования оценки спектра сигнала, а использование линейного фотоприемника снижает требования, предъявляемые к согласованию параметров акустооптического модулятора, узла пространственного преобразования Фурье, длины оптической волны и геометрических параметров фотоприемника.

Оптическое гетеродинирование может быть реализовано, например, по схеме интерферометра Маха-Цандера или Юнга. Для рассмотрения представленного далее материала это не принципиально, поэтому рассмотрим схему гомодинного акустооптического спектроанализатора (ГАОСА) на основе интерферометра Юнга (рис. 1). В состав схемы входят: 1 – источник монохроматического излучения; 2 – коллимирующая линза; 3 – двухканальный акустооптический модулятор (АОМ); 4 – сферическая линза; 5 – матричный фотоприемник (МФП).

В качестве источника излучения 1 целесообразно использовать полупроводниковый или газовый лазер. Генерируемое им расходящееся излучение на длине волны λ_d преобразуется коллимирующей линзой 2 в плоскую волну. Далее световой поток облучает апертуру двухканального АОМ 3, на один из входов которого подается анализируемый сигнал $s(t)$, а на другой – опорный сигнал $r(t)$. После прохождения АОМ световой поток фокусируется сферической линзой 4 в плоскости апертуры фотоприемника 5. В качестве опорного сигнала для ГАОСА можно использовать широкополосные ЛЧМ-импульсы [10] или радиоимпульсы на основе псевдослучайной последовательности [11], которые обеспечивают оптическое гетеродинирование в широком диапазоне радиочастот.

Метод формирования квадратурных компонент на основе трех строк фотоприемника. Рассмотрим математическую модель ГАОСА. Распределение заряда в апертуре МФП задается выражением [1]:

$$Q(x_2, y_2, T_H) = R_\lambda A \left\{ W_s(x_2, y_2, T_H) + W_r(x_2, y_2, T_H) + 2 \operatorname{Re} \left[\int_0^{T_H} \dot{S}(x_2, y_2, t) \dot{R}^*(x_2, y_2, t) dt \right] \right\}, \quad (1)$$

где R_λ – спектральная чувствительность фотоприемника; A – масштабный множитель, учитывающий преобразование входных сигналов в световой поток в АОМ; T_H – время накопления; $W_s(x_2, y_2, T_H)$ и $W_r(x_2, y_2, T_H)$ – пространственные энергетиче-

ские спектры анализируемого и опорного сигналов соответственно, сформированные за время T_H ; $\dot{S}(x_2, y_2, t)$ и $\dot{R}(x_2, y_2, t)$ – мгновенные пространственные спектры анализируемого и опорного сигналов соответственно; * – символ комплексного сопряжения¹.

Третье слагаемое в (1) позволяет выделить информацию об амплитудном и фазовом спектре анализируемого сигнала. После взятия реальной части (1) получим²:

$$Q(x_2, y_2, T_H) = A_v(y_2) \{ W_s(x_2, y_2, T_H) + W_r(x_2, y_2, T_H) + 2 \int_0^{T_H} |\dot{S}(x_2, y_2, t)| |\dot{R}^*(x_2, y_2, t)| \times \cos[(kD/F)y_2 + \psi_s(x_2, t) - \psi_r(x_2, t)] dt \}, \quad (2)$$

где $A_v(y_2)$ – распределение заряда по вертикали; k – волновое число световой волны; D – расстояние между каналами АОМ; F – фокусное расстояние линзы 4; $\psi_s(x_2, t)$ и $\psi_r(x_2, t)$ – мгновенные фазовые спектры анализируемого и опорного сигналов соответственно.

Функция $A_v(y_2)$ в случае сферической линзы 4, реализующей двумерное пространственное преобразование Фурье, имеет вид

$$A_v(y_2) = \text{sinc}^2 \{ [kH_a / (2F)] y_2 \},$$

где H_a – высота акустического пучка в АОМ; F – фокусное расстояние линзы 4 (рис. 1).

В (2) амплитудный спектр анализируемого сигнала умножается на амплитудный спектр опорного сигнала и на пространственную несущую с полной фазой, формируемой мгновенными фазовыми спектрами обоих сигналов и слагаемого, линейно меняющегося вдоль вертикальной координаты y_2 . Избавиться от пространственной несущей можно, сформировав дополнительно квадратурную компоненту спектра. В [8] для этого используется считывание четырех строк МФП. Однако считывание дополнительных строк, если оно не осуществляется параллельно через отдельные регистры

МФП, кратно увеличивает время вывода информации и время развертки спектра соответственно.

Рассмотрим модификацию этого метода, позволяющую ограничиться считыванием трех строк. Полная фаза пространственной несущей в (2) содержит слагаемое, линейно изменяющееся по координате y_2 и не зависящее от времени t и горизонтальной координаты x_2 . Эта компонента может рассматриваться как начальная фаза, постоянная относительно указанных переменных, что позволяет за счет смещения вдоль y_2 на Δy_2 вносить заданный фазовый сдвиг:

$$\Delta\varphi = (kD/F)\Delta y_2. \quad (3)$$

При этом необходимо также учитывать изменение интенсивности по координате y_2 в соответствии с $A_v(y_2)$. Необходимые дополнительные распределения заряда будут сформированы в строках, в которых обеспечивается фазовый сдвиг $\Delta\varphi = \pm\pi/2$. Распределения заряда в считываемых строках будут иметь вид:

– в первой строке

$$Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H) = A_v(y_2) [W_s(x_2, T_H) + W_r(x_2, T_H) + 2S_{\cos}(x_2, T_H)]; \quad (4)$$

– во второй строке

$$Q_{\sin}(x_2, y_2, T_H) = A_v(y_2 + \Delta y_2) \times [W_s(x_2, T_H) + W_r(x_2, T_H) + 2S_{\sin}(x_2, T_H)]; \quad (5)$$

– в третьей строке

$$Q_{-\sin}(x_2, y_2, T_H) = A_v(y_2 - \Delta y_2) \times [W_s(x_2, T_H) + W_r(x_2, T_H) + 2S_{-\sin}(x_2, T_H)], \quad (6)$$

где

$$S_{\cos}(x_2, T_H) = \int_0^{T_H} |\dot{S}(x_2, t)| |\dot{R}(x_2, t)| \times \cos[(kD/F)y_2 + \psi_s(x_2, t) - \psi_r(x_2, t)] dt;$$

$$S_{\sin}(x_2, T_H) = \int_0^{T_H} |\dot{S}(x_2, t)| |\dot{R}(x_2, t)| \times \sin[(kD/F)y_2 + \psi_s(x_2, t) - \psi_r(x_2, t)] dt;$$

$$S_{-\sin}(x_2, T_H) = - \int_0^{T_H} |\dot{S}(x_2, t)| |\dot{R}(x_2, t)| \times \sin[(kD/F)y_2 + \psi_s(x_2, t) - \psi_r(x_2, t)] dt$$

¹ При формировании (1) дискретная структура фотоприемника и интегрирование в пределах светочувствительных элементов не учитываются.

² В дальнейшем выводе непринципиальные для рассмотрения константы R_λ и A опущены.

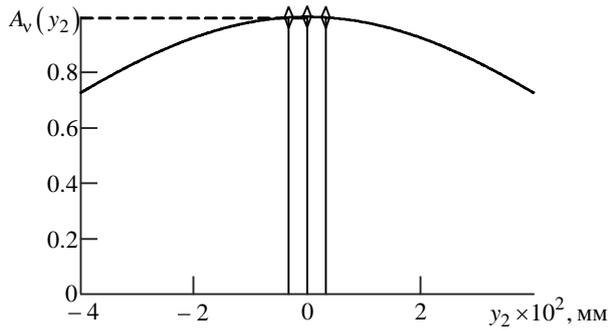


Рис. 2. Вертикальное сечение аппаратной функции спектроанализатора

Fig. 2. Vertical section of spectrum analyzer instrument function

– варианты третьего слагаемого из (2), в которых смещением обеспечивается закон изменения пространственной несущей согласно функциям вида \cos , \sin и $-\sin$ соответственно. Отметим, что

$$S_{-\sin}(x_2, T_H) = -S_{\sin}(x_2, T_H).$$

После считывания зарядов необходимо выровнять распределения по амплитуде в соответствии с множителями $A_v(y_2)$, $A_v(y_2 + \Delta y_2)$ и $A_v(y_2 - \Delta y_2)$. При этом важно, чтобы перечисленные множители не обращались в ноль. Проверим это, задавшись следующими типичными для практики параметрами: длина волны лазера $\lambda = 650$ нм; фокусное расстояние линзы $4 F = 200$ мм; расстояние между каналами АОМ $D = 10$ мм; высота акустического пучка в канале АОМ $H_a = 1$ мм. Первую строку расположим в сечении $y_2 = 0$, тогда из (3) получим смещение относительно нее двух других строк: $\Delta y_2 = 3.25$ мкм вверх и вниз. При этом

$$A_v(0) = 1; A_v(\Delta y_2) = A_v(-\Delta y_2) \cong 0.998. \quad (7)$$

Таким образом, для выбранных параметров все 3 строки лежат в пределах главного лепестка функции $A_v(y_2)$ (рис. 2).

Далее без потери общности положим, что распределения (4)–(6) нормированы на соответствующие значения A_v (7).

На основании (4)–(6) запишем:

$$Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H) - Q_{\sin}(x_2, y_2, T_H) = 2[S_{\cos}(x_2, T_H) - S_{\sin}(x_2, T_H)]; \quad (8)$$

$$Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H) - Q_{-\sin}(x_2, y_2, T_H) = 2[S_{\cos}(x_2, T_H) + S_{\sin}(x_2, T_H)]. \quad (9)$$

Тогда:

$$S_{\cos}(x_2, T_H) = (1/4)[2Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H) - Q_{\sin}(x_2, y_2, T_H) - Q_{-\sin}(x_2, y_2, T_H)]; \quad (10)$$

$$S_{\sin}(x_2, T_H) = (1/4)[Q_{\sin}(x_2, y_2, T_H) - Q_{-\sin}(x_2, y_2, T_H)]. \quad (11)$$

Возведем обе части (8) и (9) в квадрат и просуммируем результат:

$$\begin{aligned} & 2Q_{\cos}^2(x_2, y_2, T_H) - \\ & - 2Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H)Q_{\sin}(x_2, y_2, T_H) + \\ & + 2Q_{\cos}(x_2, y_2, T_H)Q_{-\sin}(x_2, y_2, T_H) + \\ & + Q_{\sin}^2(x_2, y_2, T_H) + Q_{-\sin}^2(x_2, y_2, T_H) = \\ & = 8[S_{\cos}^2(x_2, T_H) + S_{\sin}^2(x_2, T_H)]. \quad (12) \end{aligned}$$

Зависимость полной фазы пространственной несущей от времени для всех трех строк определяется распространением сигналов вдоль апертуры каналов АОМ, что эквивалентно смещению по времени и наличию одинаковой линейной добавки в фазовом спектре обоих сигналов, не влияющей на конечный результат. Так как накопление в строках идет параллельно во времени, сумма квадратов в правой части (12) не будет содержать пространственной несущей. Извлекая корень и обозначив результат как $S_R(x_2, T_H)$, получим

$$S_R(x_2, T_H) = 2\sqrt{2} \int_0^{T_H} |\dot{S}(x_2, t)| |\dot{R}(x_2, t)| dt. \quad (13)$$

В (13) множитель, соответствующий амплитудному спектру опорного сигнала, может быть оценен заранее и в дальнейшем учтен при нормировке. Точность этой операции зависит от стационарности амплитудного спектра опорного сигнала.

Левая часть (12) описывает математические операции, которые должны быть произведены над распределениями зарядов в строках фотоприемника. Однако целесообразнее выполнить вычисления по (8) и (9), результаты возвести в квадрат и сложить. Эти операции, а также взятие корня для нахождения (13) и нормировка могут быть выполнены цифровым устройством постобработки после считывания и оцифровывания распределений зарядов в строках МФП.

Отношение (10) к (11) позволяет получить информацию о фазовом спектре анализируемого сигнала:

$$\psi_s(x_2, T_H) = \arctg \left[\frac{S_{\sin}(x_2, T_H)}{S_{\cos}(x_2, T_H)} \right] + \psi_r(x_2, T_H),$$

для чего необходимо знание фазового спектра опорного сигнала $\psi_r(x_2, T_H)$. Получить этот спектр можно, например подав на вход спектроанализатора радиосигнал с простым фазовым спектром и выполнив калибровку.

В соответствии с (3) для формирования требуемого распределения поля по строкам МФП необходимо при заданных значениях расстояния D между каналами в АОМ, длины волны лазера λ_d , определяющей значение волнового числа, и вертикального размера пиксела МФП, определяющего шаг по оси y_2 , рассчитать фокусное расстояние F линзы Фурье. При этом необходимо учитывать, что размеры пиксела определяют точность формирования распределений (4)–(6).

Квадратурные составляющие формируются одновременно, что не накладывает дополнительных ограничений на анализируемый сигнал, а анализатор сохраняет способность работать в реальном времени без пропусков. Время анализа при этом определяется временем, необходимым для считывания трех строк фотоприемника и выполнения вычислений.

Метод формирования квадратурных компонент на основе последовательного считывания трех распределений заряда. Распределения вида (4)–(6) можно также сформировать за счет вариации фазового спектра опорного сигнала, так как этот сигнал детерминирован и может быть сформирован с любыми заданными параметрами, а его фаза определяет полную фазу пространственной несущей.

Предположим, что первый цикл накопления заряда выполнялся при опорном радиосигнале $r_1(t)$ и было получено распределение заряда вида (4). Сформируем еще один опорный сигнал $r_2(t)$, отличающийся от первого только изменением начальной фазы на $+\pi/2$. Цикл накопления с $r_2(t)$ даст, очевидно, распределение заряда (5). Третий цикл накопления осуществим для опорного сигнала $r_3(t)$, являющегося сдвинутым на $-\pi/2$ сигналом $r_1(t)$, и получим распределение заряда (6).

Описанный метод не требует применения МФП. Для регистрации излучения и накопления заряда могут использоваться линейные сенсоры с накоплением, имеющие пиксел, размер которого

по оси y_2 существенно превосходит размер по оси x_2 (см. рис. 1), обладающие за счет этого большим динамическим диапазоном [12]. В ГАОСА, реализующих этот метод, могут применяться и сенсоры с временной задержкой и накоплением [13]–[15], что также позволяет расширить динамический диапазон.

Недостаток последнего метода заключается в повышенных требованиях к стационарности анализируемого сигнала $s(t)$: его спектр должен быть одинаков в каждом из трех циклов накопления.

Формирование опорных сигналов. Для организации циклов накопления может быть использована простая с технической точки зрения схема формирования требуемой последовательности опорных сигналов (рис. 3). Генератор опорного сигнала 1 формирует видеосигнал с заданными спектральными характеристиками. Перенос на рабочую частоту АОМ осуществляется смесителем 2, на вход гетеродина которого подается сигнал с генератора 4. Управляемый фазовращатель 3 обеспечивает требуемый фазовый сдвиг в каждом из циклов накопления. Усилитель 5 обеспечивает необходимый для работы ГАОСА уровень опорного сигнала.

Тройка циклов накопления последовательно повторяется. При этом любые 3 соседних цикла такой последовательности могут быть использованы для расчета квадратурных составляющих, так как по мере считывания очередного накопленного заряда будет меняться только порядок следования распределений (4)–(6) в последних трех выходных сигналах фотоприемника. Таким образом, на основе этой последовательности может быть организовано более гибкое вычисление с обновлением кадра спектра сигнала с каждым новым циклом накопления, что дополнительно уменьшает время анализа до значения, затрачиваемого на считывание одной строки вместо трех или четырех.

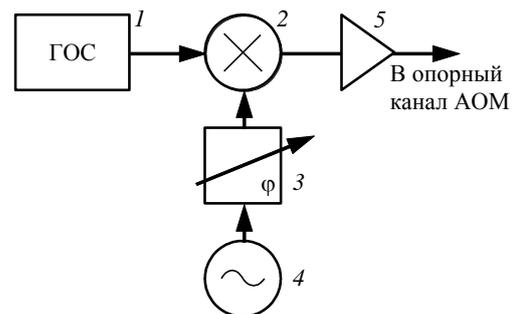


Рис. 3. Генератор опорного сигнала с вариацией фазы
 Fig. 3. The generator of reference signal with varied phase

Точность фазовых отношений задается фазовращателем и не требует комплексного подбора параметров узлов устройства (длины волны лазера, геометрических размеров фотоприемника, фокусного расстояния линзы, расстояния между каналами АОМ и высоты акустического пучка в канале), как в рассмотренном ранее методе с использованием двумерного МФП и считыванием дополнительных строк.

Влияние ошибки установки фазовых соотношений. Численное моделирование показало (рис. 4), что отклонение по фазе между квадратурными компонентами спектра от $\pi/2$ приводит к возникновению ошибок при оценке амплитудного спектра входного сигнала, зависящих от его фазы, являющейся случайной величиной. На рис. 4 показана зависимость разброса выходного сигнала ГАОСА Δ_{IF} от дополнительного сдвига α полной фазы пространственной несущей в (4). Разброс выходного сигнала анализатора может рассматриваться как ухудшение отношения сигнал/шум и снижение динамического диапазона устройства.

Моделирование также показало, что уровень разброса меняется в зависимости от того, в какой из строк, описываемых распределениями (4)–(6), нарушаются фазовые соотношения. Наибольший разброс наблюдается при возникновении ошибки в распределении (4). Как следует из рис. 5, уровни разброса в распределениях (5) (кривая 1) и (6) (кривая 2) также различны. Это вызвано особенностью получения квадратурных компонент по трем строкам, заложенной в предложенный алгоритм. Учитывая относительность фазовых соотношений в (4)–(6), целесообразно считать распределение заряда в верхней (первой при последовательном формировании спектра) из трех строк описываемым выражением (5), средней (второй) строки – (4) и нижней (третьей) – (6).

Необходимо также учитывать, что распределения заряда должны быть получены при стационарности входного сигнала в течение времени $3T_{\text{H}}$, которое с учетом быстродействия и количества пикселей линейных фотоприемников с накоп-

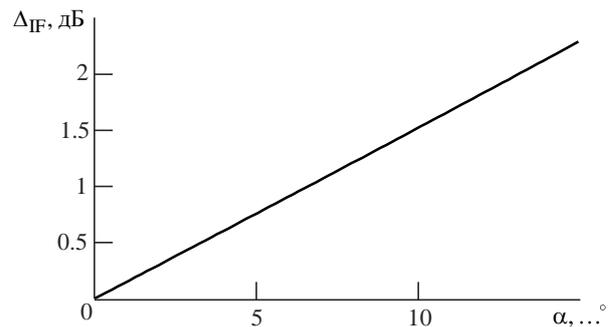


Рис. 4. Разброс значений аппаратной функции
Fig. 4. The variance of instrument function

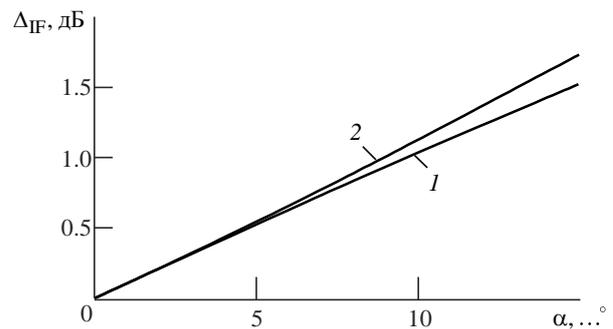


Рис. 5. Разброс значений аппаратной функции для различных строк
Fig. 5. The variance of instrument function for different lines

лением составляет от нескольких десятков микросекунд до единиц миллисекунд. Это означает, что устройство будет не способно качественно анализировать одиночные сигналы длительностью менее $3T_{\text{H}}$ и сигналы, спектр которых нестационарен в течение указанного интервала времени.

Заключение. Представленные в настоящей статье методы формирования квадратурных составляющих спектра в гомодинном акустооптическом спектроанализаторе в сравнении с подходом, описанным в [9], в разной степени позволяют уменьшить время анализа, что для спектроанализаторов, работающих в режиме реального времени, является одним из существенных параметров. С точки зрения практической реализации метод на основе вариации начальной фазы опорного сигнала представляется более простым и точным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустооптические процессоры спектрального типа / под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
2. Lugt A. Vander. Optical Signal Processing. N. Y.: Wiley Interscience, 2005. 604 p.

3. Acousto-optic signal processing: theory and implementation / ed. by N. J. Berg, J. M. Pelligrino. N. Y.: Marcel Dekker, inc, 1996. 580 p.

4. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: учеб. пособие: в 2 т. Т. 2 / пер. с англ. Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2012. 784 с.

5. Lugt A. Vander. Interferometric spectrum analyzer // *App. Opt.* 1981. Vol. 20, № 16. P. 2770–2779. doi: 10.1364/AO.20.002770

6. Interferometric Bragg cell spectrum analyzer / M. L. Shah, E. H. Young, A. Vander Lugt, M. Hamilton // 1981 Ultrasonics Symp. 14–16 Oct. 1981, Chicago, IL, USA. Piscataway: IEEE, 1981. P. 743–746. doi: 10.1109/ULTSYM.1981.197720

7. Wideband interferometric acousto-optic Bragg cell spectrum analyser / M. L. Shah, J. R. Teague, R. V. Belfatto, D. W. Thomson, E. H. Young // *Proc. Ultrasonics Symp.* 14–16 Oct. 1981, Chicago, IL, USA. Piscataway: IEEE, 1981. P. 740–742. doi: 10.1109/ULTSYM.1981.197719

8. Грачев С. В., Рогов А. Н., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием // *Радиотехника.* 2003. Вып. 4. С. 23–28.

9. Автоматизированный акустооптический спектрометр-фазометр с цифровой обработкой двумерного светового распределения / Ю. В. Егоров, Ю. С. Дмитри-

ев, В. М. Дернов, С. В. Грачев, А. Ю. Одинцов, И. А. Круглов, Б. В. Федоров // *Акустооптические устройства обработки информации / ФТИ.* Л., 1989. С. 73–77.

10. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с ЛЧМ-импульсом в качестве опорного сигнала // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2013. № 5. С. 59–65.

11. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с непрерывным бинарным фазоманипулированным радиосигналом в качестве опорного сигнала // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2014. № 6. С. 13–16.

12. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11639-01_kmpd1163e.pdf (дата обращения 11.03.2019)

13. URL: <https://docplayer.net/31659030-Fairchild-imaging-ccd-5023.html> (дата обращения 11.03.2019)

14. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s10200-02-01_etc_kmpd1098e.pdf (дата обращения 11.03.2019)

15. URL: http://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-02c8/1/-/-/03-070-20031-00_PiranhaHS-82-04Kx0.pdf (дата обращения 11.03.2019)

Аронов Леонид Андреевич – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2006), старший преподаватель кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – оптическая обработка информации.

<https://orcid.org/0000-0003-2332-7826>

E-mail: Aronov.tor@gmail.com

Ушаков Виктор Николаевич – доктор технических наук (1992), профессор (1994), заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – оптическая обработка информации.

E-mail: VNUshakov1@mail.ru

REFERENCES

1. *Akustoopticheskie protsessory spektral'nogo tipa* [Acousto-Optic Processors of Spectral Type]. Ed. by V. V. Proklov, V. N. Ushakov. Moscow, *Radiotekhnika*, 2012, 192 p. (In Russ.)

2. Lugt A. Vander. *Optical Signal Processing*. New York, Wiley Interscience, 2005, 604 p.

3. *Acousto-Optic Signal Processing: Theory and Implementation*. Ed. by N. J. Berg, J. M. Pelligrino. New York, Marcel Dekker, inc, 1996, 580 p.

4. Saleh B. E. A., Teich M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York, John Wiley & Sons, 1991. 947 p.

5. Lugt A. Vander. Interferometric Spectrum Analyzer. *Applied Optics*. 1981, vol. 20, no. 16, pp. 2770–2779. doi: 10.1364/AO.20.002770

6. Shah M. L., Young E. H., Vander Lugt A., Hamilton M. Interferometric Bragg Cell Spectrum Analyzer. *Proc. Ultrasonics Symposium.* 14–16 Oct. 1981, Chicago, IL, USA. 1981, pp. 743–746. doi: 10.1109/ULTSYM.1981.197720

7. Shah. M. L., Teague J. R., Belfatto R. V., Thomson D. W., Young E. H. Wideband Interferometric Acousto-Optic

Bragg Cell Spectrum Analyzer. 1981 Ultrasonics Symposium. 14–16 Oct. 1981, Chicago, IL, USA. 1981, pp. 740–742. doi: 10.1109/ULTSYM.1981.197719

8. Grachev S. V., Rogov A. N., Ushakov V. N. Homodyne Acousto-Optic Spectrum Analyzer with Spatial and Temporal Integration. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2003, no. 4, pp. 23–28. (In Russ.)

9. Egorov Yu. V., Dmitriev Yu. S., Dernov V. M., Grachev S. V., Odintsov A. Yu., Kруглов I. A., Федоров B. V. *Avtomatizirovanniy akustoopticheskii spektrometr-fazometr s tsifrovoy obrabotkoi dvumernogo svetovogo raspredeleniya* [Automated Acousto-Optic Spectrometer – Phase Meter with Digital Processing of Two-Dimensional Light Distribution. In the book: *Acoustic-Optical Information Processing Devices*]. Leningrad, *FTI*, 1989, pp. 73–77. (In Russ.)

10. Aronov L. A., Ushakov V. N. Homodyne Acousto-Optic Spectrum Analyzer with Chirp Pulse as a Reference Signal. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2013, no. 5, pp. 59–65. (In Russ.)

11. Aronov L. A., Ushakov V. N. Homodyne Acousto-Optic Spectrum Analyzer with Continuous Binary Phase-Manipulated Radio Signal as a Reference Signal. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2014, no. 6, pp. 13–16. (In Russ.)

12. Available at: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11639-01_kmpd1163e.pdf (accessed 11.03.2019)

13. Available at: <https://docplayer.net/31659030-Fairchild-imaging-ccd-5023.html> (accessed 11.03.2019)

14. Available at: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s10200-02-01_etc_kmpd1098e.pdf (accessed 11.03.2019)

15. Available at: http://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-02c8/1/-/-/-/03-070-20031-00_PiranhaHS-82-04Kx0.pdf (accessed 11.03.2019)

Leonid A. Aronov – Master's Degree in Telecommunications (2006), Senior Lecturer of the Department of Theoretical Bases of Radioengineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 20 scientific publications. Area of expertise: optical information processing.
<https://orcid.org/0000-0003-2332-7826>

E-mail: Aronov.tor@gmail.com

Victor N. Ushakov – Dr. of Sci. (Engineering) (1992), Professor (1994), Head of the Department of Theoretical Bases of Radioengineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: optical information processing.

E-mail: VNUshakov1@mail.ru

Книжные новинки



УДК 502.175
ББК Ж 3-1с33+Б 1с11
Ц17

Авторы: Цаплев В. М., Кузьмин Ю. И.
Электрофизические методы исследования окружающей среды.

СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 197 с.
ISBN 978-5-7629-2423-8

Рассматриваются решения прикладных задач по определению параметров материалов и сред электрофизическими методами. Обсуждаются вопросы взаимосвязи между различными эффектами, влияющими на свойства сыпучих веществ, почв и горных пород. Описываются оригинальные результаты, такие, как определение движущихся тел в морской воде в условиях мелководья и частотная дисперсия модулей упругости, которую не удается выявить обычными методами, спектр энергий активации процессов, ответственных за явления ползучести, и т. д.

Рассчитано на научных работников, инженеров, разрабатывающих приборы и устройства, содержащие пьезокерамические элементы, предназначенные для работы в условиях действия значительных нагрузок; на студентов, обучающихся по направлению подготовки 200100 – «Приборостроение» в области техники и технологии, на аспирантов и специалистов, повышающих квалификацию по соответствующим образовательным программам и занимающихся исследованиями в области физики твердого тела и материаловедения.