

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

УДК 621.396.62

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛА С УЧЕТОМ ВИДА АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

А.И. Стрелков¹, Е.И. Жилин¹, В.В. Марченко², А.П. Лытюга¹
(¹Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков,
²СКБ «Топаз», Донецк)

Статья посвящена синтезу оптимального алгоритма оценки пространственного положения оптических сигналов в фокальной плоскости акустооптического анализатора спектра радиосигналов. Рассмотрены условия формирования оптимальной оценки параметров оптических сигналов при их акустооптическом преобразовании. Синтезирован оптимальный алгоритм, позволяющий найти максимально правдоподобную оценку анализируемого параметра, предложен вариант его технической реализации.

частота радиосигнала, аппаратная функция, акустооптический анализатор спектра

Введение. Состояние радиочастотного ресурса Украины, на сегодняшний день, характеризуется высокой интенсивностью его использования в широком диапазоне частот различными категориями пользователей. Наличие устойчивой тенденцией к росту числа пользователей, по данным Национальной комиссии по вопросам регулирования связи, может послужить, в будущем, причиной возникновения дефицита свободных полос частот, а так же нарушением условий электромагнитной совместимости [1]. В соответствии с Законом Украины «Про радиочастотный ресурс Украины» [2], обеспечение максимально эффективного использования радиочастотного ресурса Украины основывается на четком разграничении полос частот с соблюдением интересов всех категорий пользователей и осуществлении строгого государственного надзора в этой сфере. В этом случае радиочастотный мониторинг выступает как практическая процедура государственного надзора за использованием радиочастотного ресурса, а задача совершенствования технических средств радиочастотного мониторинга приобретает особую актуальность.

Одной из задач радиочастотного мониторинга является получение, обобщение и анализ параметров сигналов, формируемых радиотехническими устройствами и излучаемых в соответствующих диапазонах радиочастот [2]. Применение для решения данной задачи акустооптических методов спектрального анализа позволяет, в отличие от других методов (фильтровых, дисперсионно-временных, корреляционно-временных и др.), проводить панорамное обнаружение радиосигналов в широком динамическом и частотном диапазоне в реальном масштабе времени [3, 4]. Существенным недостатком устройств, реализующих акустооптических метод спектрального анализа радиосигналов, является их относительно низкая частотная точность, определяемая точностью отсчета частоты регистрируемого радиосигнала и разрешающей способностью [5]. Таким образом, с точки зрения повышения эффективности радиочастотного мониторинга, задача оптимизации процесса измерения частоты радиосигналов, может рассматриваться как практический вклад в улучшение частотной точности технических средств спектрального анализа и является актуальной.

Анализ вопроса. Анализ ряда работ [4 – 6] посвященных теории разработки устройств акустооптического преобразования и обработки сигналов позволяет констатировать смежность таких характеристик частотной точности, как точности отсчета частоты радиосигнала и разрешающей способности для рассматриваемого класса приборов. При этом под разрешающей способностью акустооптического анализатора спектра понимают его способность разрешать две близкие частотные составляющие анализируемого спектра или два соседних по частоте радиоизлучения [4 – 6]. Количественно разрешающую способность определяют, как минимальный интервал по частоте между двумя радиоизлучениями или составляющими спектра, при котором обеспечивается их надежное разделение. Характеристика точности отсчета частоты, позволяет судить, с какой точностью можно измерить частотный интервал между соседними частотными составляющими или истинное значение каждой из них [4].

Действительно, в практике проектирования и построения акустооптических и в частности оптических устройств спектрального анализа разрешающая способность и точность отсчета частоты определяются параметрами аппаратной функции, формируемой данными устройствами и выбранным критерием разрешения. В большинстве случаев для характеристики частотной точности прибора вводится понятие критерия Рэля, для определения которого рассматривается случай воздействия на вход акустооптического преобразователя двух гармонических сигналов разнесенных по частоте на величину Δf [4, 5]. В этом случае в фокальной плоскости устройства формируется два оптических сигнала, распределение интенсивности каждого из которых вдоль плоскости фотоприемника описывается аппаратной функцией вида $\sin^2(x)/x^2$, а линейное расстояние Δx между максимумами нулевых порядков пропорционально Δf . Согласно рассматриваемого кри-

терия, предел разрешения двух сигналов в дифракционно ограниченной оптической системе достигается, если максимум нулевого порядка одного сигнала, совпадает с минимумом первого порядка второго. Таким образом, предел разрешения и точность отсчета частоты сигнала по критерию Рэлея, в конечном счете, определяется самим прибором, а именно обратно пропорционален ширине его аппаратной функции [4, 5, 10].

Анализ рассмотренного выше критерия разрешения, приведенный в [11] показывает, что он, по существу, ориентирован на качественные наблюдения, а величина разрешающей способности, полученная на основании такого определения, не соответствует современным требованиям к измерительной технике. Так, например, известное мнение о том, что предел разрешающей способности и точности отсчета частоты сигнала определяется свойствами прибора и, в частности, шириной формируемой аппаратной функции, при исследовании процедуры восстановления входа по неточно известному выходу оказывается неверным для широкого класса входных сигналов с финитным спектром.

Несоответствие релейского понятия разрешающей способности результатам экспериментов с количественными измерениями привело к широкому обсуждению самого понятия разрешения и анализу соответствующих критериев. Результаты исследований в области теории разрешения и приведенные в работах [11 – 14] позволяют говорить о том, что предел разрешения и точность измерения отсчета частоты становится не свойством самого прибора, и определяется в частности, не шириной его аппаратной функции, а точностью снятия выходного процесса. В свою очередь, точность регистрации выходных сигналов в идеальных условиях эксперимента определяется флуктуационными процессами в аппаратуре. Поэтому непреодолимым является лишь флуктуационный предел разрешения, обусловленный объективными физическими явлениями (дискретность заряда, квантовая природа оптического излучения и т.д.). Таким образом, частотная точность существующих акустооптических анализаторов спектра, выбор параметров фотоприемных устройств которых основывался на принципах релейского разрешения, может быть существенно улучшена путем применения специальных процедур регистрации и обработки оптических сигналов, учитывающих их статистические свойства, обусловленные природой их формирования.

Постановка задачи. В качестве теоретической основы для разработки таких процедур могут быть использованы математические модели сигналов и процессов, протекающих в акустооптическом анализаторе (рис. 1) при анализе спектральных характеристик радиосигналов [15 – 17]. Изложенная в [15 – 17] математическая модель оптических сигналов акустооптического анализатора спектра основана на совместном использования основных положений волновой и корпускулярной теории света, статистической теории случайных потоков, и позволяют учесть статистические характеристики анали-

зируемых сигналов и вероятностный характер их преобразования. Использо-

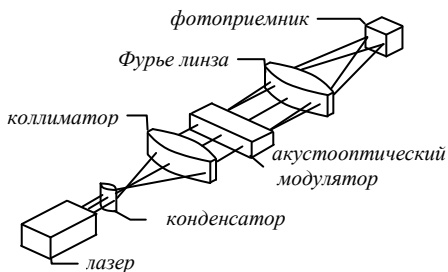


Рис. 1. Структурная схема акустооптического анализатора

вание новых математических моделей позволяет усовершенствовать алгоритмы статистической обработки сигналов акустооптического анализатора спектра и тем самым предоставляет возможность для модернизации используемых технических средств формирования, преобразования и регистрации оптических сигналов.

При решении задач спектрального анализа радиосигналов акустооптическая обработка проводится с целью обнаружения радиосигнала и измерения его несущей частоты. Обычно результаты акустооптического спектрального анализа представляются в виде развертки снимаемого с ПЗС линейки напряжения, при этом пространственное положение x_α главного максимума формируемой акустооптической системой аппаратной функции пропорционально несущей частоте анализируемого радиоизлучения f_α . Согласно рассматриваемой математической модели аппаратная функция акустооптического преобразователя определяется в соответствии с основными положениями волновой теории света и представляет собой результат Фурье преобразования дифрагировавшего на акустических волнах светового потока. Сама аппаратная функция может быть представлена, как пространственное распределение интенсивности оптического сигнала в фокальной плоскости фотокатода акустооптического анализатора спектра и записанное в виде пропорциональности

$$E(x) \sim E_0 \sin a(x - x_0) / (a(x - x_0)), \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда электрической составляющей световой волны в точке $x = x_0$; a – размерный коэффициент пропорциональности, учитывающий параметры оптической системы и акустооптического преобразователя.

Применение корпускулярной теории света при составлении математической модели позволяет учесть квантовые шумы регистрируемых фотоприемником сигнала и помехи, вызванных их корпускулярной природой. С этой точки зрения оптическое излучение может быть представлено как случайный поток фотонов, где количество фотонов регистрируемых фотоприемником за интервал накопления T_n пропорционально квадрату модуля амплитуды электрической составляющей электромагнитной волны. Если представить работу фотокатода, как работу по преобразованию потока квантов в поток носителей заряда n_s , тогда выражение (1) можно записать в виде

$$n_s(x) \sim |E(x)|^2 \sim n_0 |\sin a(x - x_0) / (a(x - x_0))|^2. \quad (2)$$

Считая, что случайный поток носителей заряда подчиняется закону Пуассона, характеризуем такой поток вероятностью появления n носителей в i -й элементарной области (элементе разрешения фотокатода) размером по оси x Δx , за время T_H ^

$$P_s(n_i) = \frac{\bar{n}_{si}^{n_i}}{n_i!} e^{-\bar{n}_{si}}. \quad (3)$$

Аналогичная запись будет верна и для случая помеховой составляющей аддитивной смеси «сигнал + помеха», которую с учетом ее пространственной стационарности $\bar{n}_{f1} = \dots = \bar{n}_{fm} = \bar{n}_f$ запишем

$$P_f(n_i) = \frac{\bar{n}_f^{n_i}}{n_i!} e^{-\bar{n}_f}. \quad (4)$$

Переход к многомерной плотности вероятности дискретных величин выполним с учетом (3), (4) и введенного условия пространственной стационарности помеховой составляющей и получим для случая наличия и отсутствия сигнальной составляющей соответственно:

$$P_{sf}(n_1, \dots, n_m; \Delta x_1, \dots, \Delta x_m) = \prod_{i=1}^m \frac{((\bar{n}_{si} + \bar{n}_f) T_H \Delta x_i)^{n_i}}{n_i!} e^{-((\bar{n}_{si} + \bar{n}_f) T_H \Delta x_i)}; \quad (5)$$

$$P_f(n_1, \dots, n_i, \dots, n_m; \Delta x_1, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_m) = \prod_{i=1}^m \frac{(\bar{n}_f T_H \Delta x_i)^{n_i}}{n_i!} e^{-[\bar{n}_f T_H \Delta x_i]}. \quad (6)$$

Таким образом, для оптимизации процесса измерения частоты радиосигнала в акустооптическом анализаторе спектра, необходимо и возможно синтезировать оптимальную оценку параметра x_0 условно-пуассоновского шумоподобного сигнала принимаемого на фоне аддитивной пуассоновской помехи.

Синтез алгоритма. Естественным условием при синтезе алгоритма оценки является требование к ее несмещенности, состоятельности и эффективности (хотя бы асимптотически). В качестве метода получения оценки \hat{x}_0 выберем метод наибольшего правдоподобия, который можно представить в виде [18]

$$\hat{x}_{0_{\text{МП}}} = \arg \max \ln L, \quad (7)$$

где
$$L = \prod_{i=1}^m \frac{P_{sf}(n_i)}{P_f(n_i)} \quad (8)$$

отношение правдоподобия [18]. Выбор данного метода для получения оценки основан на некоторых его свойствах: простота получение оценки; в случае оценки одного параметра оценка \hat{x}_0 наибольшего правдоподобия оказывается всегда состоятельной [18, 19]; оценки наибольшего правдоподобия параметра x_0 , часто оказываются смещенными, однако

эта смещенности во многих случаях может быть устранена; если параметр x_0 допускает эффективную оценку, то эта оценка получается как единственное в этом случае решение отношения правдоподобия [19].

И так, используя выражения (5) и (6), запишем отношение правдоподобия

$$L = \prod_{i=1}^m \frac{P_{sf}(n_i)}{P_f(n_i)} = \prod_{i=1}^m \frac{((\bar{n}_{si} + \bar{n}_f) T_H \Delta x_i)^{n_i} e^{-((\bar{n}_{si} + \bar{n}_f) T_H \Delta x_i)}}{(\bar{n}_f T_H \Delta x_i)^{n_i} e^{-\bar{n}_f T_H \Delta x_i}}, \quad (9)$$

откуда для логарифма отношения правдоподобия, и случая $\frac{\bar{n}_{si}}{\bar{n}_f} \ll 1$ получим

$$\ln L = \frac{n_0}{\pi_f} Y(x_0) - W_S, \quad (10)$$

где для простоты записи введены следующие обозначения:

$$Y(x_0) = \sum_{i=1}^m n_i \left| \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right|^2; \quad (11)$$

$$W_S = \sum_{i=1}^m n_0 \left| \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right|^2 \Delta x T_H. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) очевидно, что величина W_S пропорциональна энергии ожидаемого сигнала. В то же время из (10) и (11) следует, что величина логарифма отношения правдоподобия с точностью до постоянных коэффициентов определяется функцией $Y(x_0)$, которую, переобозначив, и следует принять для дальнейших рассуждений в качестве достаточной статистики (10)

$$S(L) = \sum_{i=1}^m n_i \left| \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right|^2. \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет осуществить переход к пространственно непрерывному случаю регистрации дифракционной картины

$$S(L) = \int_0^{x_{\max}} U(x) \left| \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right|^2 dx, \quad (14)$$

где $U(x)$ – реализация аддитивной смеси «сигнал + помеха».

С учетом вышесказанного оптимальную оценку искомого параметра, найдем из условия максимума выражения (13), при этом будем иметь

$$\frac{\partial}{\partial x_0} S(L) = 0, \quad (15)$$

откуда продифференцировав, для значений отношения с/ш $\rho \gg 1$ получим

$$\frac{\partial}{\partial x_0} S(L) = \int_0^{x_{\max}} U(x) \cdot Z(x - x_0) dx, \quad (16)$$

$$\text{где } Z(x - x_0) = 2a \cdot \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \cdot \left[\left(\frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} - \cos a(x - x_0) \right) / \left(a(x - x_0) \right) \right]. \quad (17)$$

Как видно из приведенных выражений (16), (17) поиск их аналитического решения относительно искомого параметра представляется достаточно трудоемким, по этому процедура поиска оценки параметра \hat{x}_0 на практике может быть осуществлена численными методами интегрирования. Таким образом, выражения (16) и (17) определяют процедуру поиска оптимальной, по критерию максимума отношения правдоподобия, оценки параметра сигнала \hat{x}_0 . В этом случае процедура обработки принимаемой реализации подобна корреляционной, когда принимаемая реализация $U(x)$ перемножается на строб вида $Z(x - x_0)$ (рис. 2).

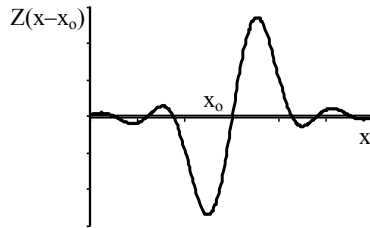


Рис. 2. Пространственная структура строба

Однако, анализ (17) в области значений $x \rightarrow x_0$ указывает на наличие неопределенности вида $0/0$. Для раскрытия указанной неопределенности введем обозначение $x - x_0 \approx \varepsilon$, где $\varepsilon \rightarrow 0$ и найдем предел для третьего члена правой части выражения (17), откуда после простых преобразований получим

$$\lim_{x_0 \rightarrow x - \varepsilon, \varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sin a\varepsilon / (a\varepsilon) - \cos a\varepsilon}{a\varepsilon} = \frac{(a\varepsilon)^2}{2\varepsilon} = 0. \quad (18)$$

Таким образом, неопределенность в (17) может быть снята, а значение функции $Z(x - x_0)$ в области близкой к искомому значению параметра x_0 равно нулю. Действительно, в силу асимметричности формы строба (рис. 2) относительно оси ординат результат интегрирования (16) будет равен нулю или близок к нулю при наличии помеховой составляющей и (или) квантовых шумов сигнала.

Как вариант технической реализации описанной процедуры оценки параметров сигнала в акустооптическом анализаторе спектра может быть рассмотрена схема, представленная на рис. 3, принцип работы которой объясняется следующим образом. Предлагаемое схемное решение разработанного алгоритма оценки включает в себя блок обнаружения и блок оценки парамет-

ров сигнала. Процедура предварительного обнаружения сигнала введена в алгоритм с целью выбора начального значения x_0 , что обеспечивает поиск оценки параметра сигнала в области его наиболее вероятных значений. В свою очередь, обнаружение сигнала может быть организована по схеме корреляционной обработки сигнала (рис. 3) с величиной порога n_0 . Поиск оценки параметра x_0 производится итерационно, при наличии решения о наличии сигнала γ_1 . В качестве максимально правдоподобной оценки искомого параметра принимается значение $x_0 \approx \hat{x}_0$ обеспечивающее на выходе блока оценки наиболее близкую к 0 величину интеграла (16). При этом, использование в качестве порога величины $\varepsilon \neq 0$, но $\varepsilon \rightarrow 0$, объясняется необходимостью учета помеховой составляющей, собственных шумов сигнала и возможной пространственной дискретизации принимаемой реализации.

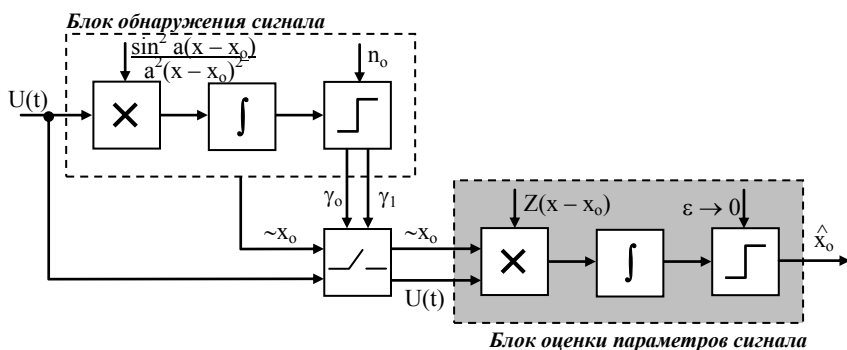


Рис. 3. Структурная схема алгоритма оценки параметра

Заключение. По результатам проведенных исследований, возможно, сделать следующие выводы: алгоритм оценки параметра сигнала x_0 синтезирован с учетом аппаратной функции акустооптического анализатора спектра и статистической структуры сигнала и помехи, что предполагает его оптимальность, при этом получаемая оценка параметра является максимально правдоподобной; обеспечение потенциальной или близкой к ней точности отсчета частоты радиосигнала может потребовать применения на практике в качестве фотоприемных устройств акустооптических анализаторов спектра фотоприемников с непрерывной пространственной структурой светочувствительного слоя, а также реализацию, наряду с разработанным алгоритмом оценки, некоторых известных методов статистической обработки оптических сигналов с целью уменьшения влияния аддитивных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. ЛИГАБизнесИнформ Украинская Сеть правовой информации. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: www.liga.net.

2. Закон Украины от 1.06.2000 г. № 1770 – III «Про радиочастотный ресурс Украины» с последними изменениями и дополнениями, внесенными Законом Украины от 25.03.2005 г. № 2505 – IV.
3. Гусев О.Е., Кулаков С.В., Разживин Б.П., Тигин Д.В. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
4. Мартынов В.А., Селихов Ю.И. Панорамные приемники и анализаторы спектра / Под ред. Заварина Г.Д. – М.: Сов. радио, 1980. – 352 с.
5. Купченко Л.Ф. Акустооптические методы обработки сигналов. – Х.: ХВВКУ, 1980. – 96 с.
6. Магдич Л.М., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. радио, 1978. – 112 с.
7. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
8. Парвулюсов Ю.Б., Солдатов В.П., Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
9. Раутиан С.Г. Реальные спектральные приборы // УФИ, XVI. – 1955. – Вып. 3.
10. Гусев О.Б., Клудзин В.В. Акустооптические измерения. – Л.: ЛГУ, 1987. – 152 с.
11. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. – М.: Наука, 1971. – 408 с.
12. Гальпери Д.Ю. О нарушении однозначной связи между изображением и предметом // Оптика и спектроскопия. – 1962. – № 1. – С. 124-128.
13. Горелик Г.С. Некоторые микрофазометрические методы в радиофизике и оптике // Измерительная техника. – 1955. – № 3. – С. 10-19.
14. Козел С.М. Модуляционный оптический интерферометр для измерения угловых размеров источника // Труды МФТИ. – 1958. – Вып. 2. – С. 3-15.
15. Стрелков А.И., Лытюга А.П., Стрелкова Т.А. / Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства // Радиотехника: Всеукр. Межвед. науч.-техн. сб. – 2003. – Вып. 132. – С. 7-13.
16. Стрелков А.И., Стрелкова Т.А., Лытюга А.П., Коротков В.В. Алгоритмы обнаружения сигналов в акустооптических анализаторах спектра // Радиотехника. – 2003. – Вып. 131. – С. 23-31.
17. Стрелков О.И., Стрелкова Т.О., Жилин Є.І., Марченко В.В. Пространственное разрешение оптических сигналов акустооптического преобразователя при анализе спектров радиосигналов на близких частотах // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 5 (45). – С. 144-151.
18. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
19. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.

Поступила 22.05.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.