

## **КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА КОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ**

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, к.т.н. А.А. Копылов, В.В. Коротков

*Экспериментально проверен способ квазиоптимальной обработки сигнала оптического датчика в режиме наблюдения коротких радиоимпульсов, компенсирующий одновременно как нелинейную зависимость эффективности акустооптического преобразования, так и уменьшение амплитуды спектральных составляющих при расширении спектра сигнала, вызванного уменьшением длительности анализируемого радиоимпульса. Приведены схема установки для экспериментальной проверки предложенного квазиоптимального способа обработки сигнала, методика и результаты эксперимента. Экспериментально подтверждено, что при квазиоптимальной обработке коротких радиоимпульсов можно на порядок увеличить соотношение сигнал/шум в схеме обнаружителя.*

**Постановка проблемы в общем виде.** Перспективным направлением построения приемных устройств быстрого распознавания радиолокационных СВЧ сигналов является применение в их составе акустооптических анализаторов спектра. Современные радиолокаторы в процессе работы могут перестраивать не только частоту излучения, но и длительность зондирующих импульсов. При этом, как правило, для постоянства характеристик обнаружения сохраняют энергию зондирующего сигнала. С уменьшением длительности такого радиоимпульса резко ухудшается соотношение сигнал/шум в акустооптическом спектроанализаторе и становится невозможным обнаружение сигнала и измерение его параметров. Поэтому задача дополнительной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора при наблюдении коротких радиоимпульсов является актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Ухудшение соотношения сигнал/шум в рассматриваемом случае вызвано рядом эффектов. Одним из таких эффектов является ухудшение эффективности акустооптического преобразования вследствие нелинейной зависимости мощности дифрагированного лазерного излучения от длительности радиоимпульса. Этот эффект рассмотрен и проанализирован в [1, 2]. Другим существенным эффектом, ухудшающим соотношение сигнал / шум при наблюдении коротких импульсов, является то, что на один фоточувствительный элемент датчика уменьшается энергия принимаемого по-

лезного сигнала вследствие расширения его спектра, что было рассмотрено и проанализировано в статье [3]. Там же была предложена пространственно-временная обработка сигнала акустооптического спектроанализатора с переменными во времени характеристиками цифрового фильтра и приведены результаты численного моделирования такой обработки, однако результаты натуральных экспериментов не приводились.

Оба вышеуказанных эффекта приводят к тому, что без дополнительной обработки практически невозможно делать оценки несущей частоты для радиоимпульсов с длительностью меньше некоторой критической величины. Поэтому важно дополнительную обработку сигнала акустооптического спектроанализатора проводить для компенсации одновременно как нелинейной зависимости эффективности акустооптического преобразования, так и уменьшения амплитуды спектральных составляющих вследствие расширения спектра сигнала. Такой вариант обработки сигнала ранее не рассматривался.

**Постановка задачи.** Известны эффекты, описанные и исследованные в [1 – 3], приводящие к ухудшению характеристик обнаружения радиоимпульсов в акустооптическом спектроанализаторе с уменьшением их длительности. Задача состоит в том, чтобы найти способ дополнительной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора для компенсации вышеуказанных эффектов и экспериментально проверить (рис. 1) его работоспособность с помощью устройства обработки, которое реализует соответствующий этому способу алгоритм обработки сигнала.

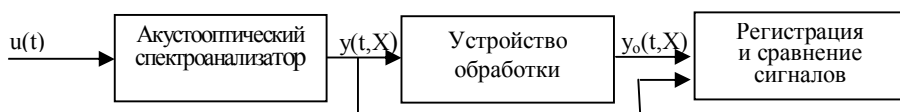


Рис. 1. Структурная схема проверки работоспособности способа дополнительной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора

**Обобщенное теоретическое решение задачи и его эмпирическое упрощение.** Входной радиоимпульс, представленный в виде зависимости напряженности электрического поля  $u(t)$  от времени  $t$  внутри акустооптического спектроанализатора превращается в бегущий вдоль апертуры акустооптического модулятора (АОМ) со скоростью  $V_A$  акустический сигнал

$$s(t, x) = k \cdot u \left( t - \frac{x}{V_A} \right) \cdot \text{rect}(A, x), \quad (1)$$

где  $x$  – пространственная координата, вдоль которой распространяется

акустическая волна;  $k$  – эффективность преобразования энергии радиосигнала в энергию акустической волны;  $\text{rect}(A, x)$  – функция прямоугольного окна, равного размеру апертуры акустооптического модулятора, определяющая ширину  $A$  участка, на котором может происходить Брегговская дифракция лазерного излучения.

В результате Брегговской дифракции когерентного лазерного излучения на акустической волне и пространственного Фурье-преобразования на тонкой цилиндрической линзе дифрагированного лазерного луча в задней фокальной плоскости в каждый момент времени возникает пространственный оптический сигнал  $S(t, X)$ , пропорциональный пространственному спектру  $S(t, \omega_X)$  акустического сигнала АОМ (1).

Электрическая регистрация выходного оптического пространственного сигнала осуществляется с помощью датчика типа линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС), напряжение на выходе фоточувствительных элементов которых пропорционально энергии сигнала с коэффициентом  $s_U$ , который называют чувствительностью (чувствительностью в определенной области спектра). Таким образом, в момент времени  $t$  выходной электрический сигнал акустооптического спектроанализатора для фоточувствительного элемента номер  $n$  равен

$$Y(t, X_n) = s_U \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t, X) \cdot \text{rect}(\Delta X, X - X_2) dX_2 \delta(X - \Delta X \cdot n) dX, \quad (2)$$

где  $\text{rect}(\Delta X, X - X_2)$  – функция прямоугольного окна, равного размеру фоточувствительного элемента, определяющая ширину  $\Delta X$  участка пространственных координат, в пределах которой происходит усреднение пространственного сигнала;  $X_2$  – вспомогательная переменная для описания усреднения оптического сигнала;  $\delta(X - \Delta X \cdot n)$  – периодическая последовательность дельта функций Дирака, описывающая пространственную дискретизацию с шагом  $\Delta X$ ;  $X$  – вспомогательная переменная для описания дискретизации пространственного сигнала.

Оптимальным приемником известного сигнала (в том числе и пространственно-временного), как известно, является коррелятор входного сигнала с этим ожидаемым известным сигналом, имеющим постоянные параметры. Для оптимальной фильтрации выходного электрического сигнала акустооптического спектроанализатора от шумов необходимо знать ожидаемый пространственный сигнал  $Y(t, X_n)$ , который связан со спектром анализируемого радиоимпульса. Однако, во-первых, пространственный сигнал на выходе акустооптического спектроанализатора из-

меняется во времени, во-вторых, часто заранее не известна форма огибающей анализируемого радиоимпульса, а значит и его спектр, в третьих, при наблюдении очень коротких радиоимпульсов не весь оптический сигнал размещается на фоточувствительной части ЛФПЗС. Поэтому имеет смысл проводить не оптимальную, а квазиоптимальную обработку сигнала акустооптического спектроанализатора, проделав некоторые эмпирические упрощения.

Первым таким упрощением будем считать то, что огибающая радиоимпульса имеет прямоугольную форму. В этом случае соответствующий ему акустический сигнал в АОМ имеет также прямоугольную форму и выходной оптический пространственный сигнал без обработки можно представить в виде

$$S(t, X) = \eta(a, x_A(t)) \cdot \frac{a \cdot x_A(t)}{2} \cdot \left[ \frac{\sin \frac{(X - X_0) \cdot x_A(t)}{2}}{\frac{(X - X_0) \cdot x_A(t)}{2}} + \frac{\sin \frac{(X + X_0) \cdot x_A(t)}{2}}{\frac{(X + X_0) \cdot x_A(t)}{2}} \right], \quad (3)$$

где  $\eta(a, x_A(t))$  – дифракционная эффективность акустооптического модулятора;  $a$  – амплитуда несущей акустической волны в акустооптическом модуляторе;  $x_A(t)$  – длина цуга акустической волны, заполняющей апертуру акустооптического модулятора в момент времени  $t$ :  $x_A(t) = A \cdot K_{\text{АОМ}}(t)$ ;  $K_{\text{АОМ}}(t)$  – коэффициент использования апертуры акустооптического модулятора.

Вторым упрощением будем считать то, что нелинейные эффекты, связанные с дифракционной эффективностью акустооптического модулятора, невелики и величина дифракционной эффективности просто определяет общий масштабный коэффициент при формировании пространственного сигнала или другими словами «рабочую точку». Это важно учитывать при выборе порога, если стоит задача оценить вероятность правильного обнаружения при стабилизированной вероятности ложной тревоги.

Таким образом, квазиоптимальная пространственная обработка сигнала акустооптического спектроанализатора состоит в нахождении пространственного корреляционного интеграла выходного сигнала (2) с опорным сигналом, определяемым выражением (3) или его дальнейшими упрощениями. Одним из наиболее простых упрощений является замена выражения (3) выражением, которое описывает прямоугольное окно

$$S_{\Pi}(t, X) = \eta_s(\tau_{\text{и}}) \cdot \text{rect}(\Delta X(\tau_{\text{и}}), X), \quad (4)$$

где  $\eta_s(\tau_{\text{и}})$  – итоговая эффективность преобразования радиосигнала в оптический сигнал, учитывающая его нелинейную зависимость от  $\tau_{\text{и}}$  –

длительности радиоимпульса;  $\Delta X(\tau_{и})$  – размер окна, определяемый размером области пространственных частот, где сосредоточена заданная часть энергии сигнала.

Квазиоптимальная пространственно-временная обработка сигнала акустооптического спектроанализатора состоит в накоплении результатов пространственной обработки сигнала с учетом времени существования акустической волны в акустооптическом спектроанализаторе

$$\tau = \frac{A}{V_A} + \tau_{и}. \quad (5)$$

**Экспериментальная проверка квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора.** Целью эксперимента является проверка реализуемости предложенного способа квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора и оценка полученного выигрыша соотношения сигнал/шум.

**Методика испытаний.** Для экспериментальной проверки предложенного способа пространственно-временной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора (блока Ч-1М) было собрано в виде отдельного блока устройство статистической обработки (УСО), представляющее собой коррелятор с функцией в виде прямоугольного окна (4), исходя из длительности радиоимпульса 0,5 мкс.

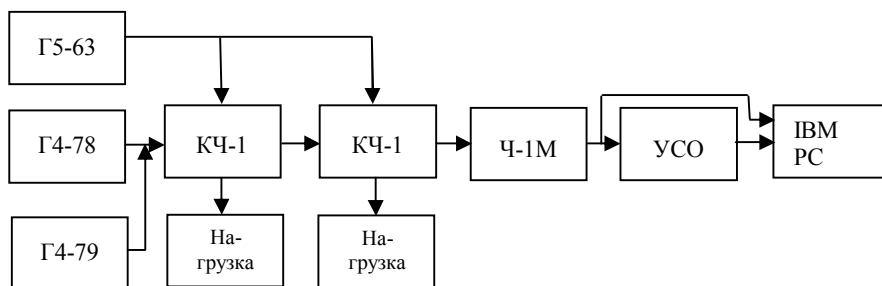


Рис. 2. Блок-схема установки для испытаний УСО

Измерения проводились по блок-схеме установки, приведенной на рис. 2. На вход блока Ч-1М через коммутаторы КЧ-1, открываемые импульсами генератора Г5-63, подавались сигналы высокочастотных генераторов Г4-78 и Г4-79. В результате формировались радиоимпульсы длительностью 2, 1, 0,5 и 0,3 мкс и частотой повторения 640 мкс. Мощность генератора на используемых частотах составляла  $10^{-4}$  Вт. Два вы-

сокочастотных генератора Г4-78 и Г4-79 обеспечивали необходимый диапазон перестройки частот, а два коммутатора КЧ-1 обеспечивали необходимую степень развязки коммутируемых каналов. Нагрузки коммутаторов принимали проходящее в них радиоизлучение при формировании радиоимпульсов. Результаты измерений фиксировались при помощи компьютера IBM PC.

**Результаты эксперимента.** В табл. 1 и 2 приведены результаты измерения амплитуд сигнала акустооптического спектроанализатора без использования модуля УСО и совместно с модулем УСО соответственно.

Таблица 1

Результаты измерения амплитуд сигнала без его дополнительной обработки

F, МГц	1500	1600	1700	1800	1900	2000
U[B] $\tau = 2$ мкс	0,5	2,7	1,3	1,5	2,5	2,5
U[B] $\tau = 1$ мкс	0,3	1,4	0,38	0,7	2,2	1,75
U[B] $\tau = 0,5$ мкс	0,4	0,5	0,2	0,3	0,25	0,3
U[B] $\tau = 0,3$ мкс	–	–	–	–	–	–

Таблица 2

Результаты измерения амплитуд сигнала с использованием блока УСО

F, МГц	1500	1600	1700	1800	1900	2000
U[B] $\tau = 2$ мкс	0,38	4,3	4,8	2,6	4,48	2,09
U[B] $\tau = 1$ мкс	0,32	2,60	3,02	3,88	3,90	3,00
U[B] $\tau = 0,5$ мкс	0,32	1,44	2,16	2,91	2,68	0,8
U[B] $\tau = 0,3$ мкс	–	1,20	0,80	0,70	1,60	–

Анализ результатов эксперимента показывает, что с уменьшением длительности анализируемого радиоимпульса выигрыш от дополнительной обработки увеличивается. На частотах 1,6 – 1,9 ГГц внутри рабочего диапазона при длительности огибающей 1 – 2 мкс выигрыш в амплитуде полезного сигнала незначительный и составляет 1,5 – 2 раза, а при длительности огибающей 0,5 мкс выигрыш от дополнительной обработки составляет около 10 раз. Отсутствие существенного выигрыша при длительностях радиоимпульса более 1 мкс объясняется тем, что энергия соответствующего оптического сигнала сосредоточена на нескольких фоточувствительных элементах датчика, определяемых предельным размером дифракционного пятна при заданной апертуре А акустооптического модулятора. Оценить выигрыш при более коротких длительностях наблюдае-

мых радиоимпульсов не представляется возможным, так как аппаратура при этой длительности без дополнительной обработки вообще не регистрировала полезный сигнал. На краях рабочего диапазона (на частотах 1,5 и 2 ГГц), по-видимому, сказываются как потери энергии при преобразовании радиоимпульса в акустический сигнал, так и расширение импульса при его прохождении через акустический облучатель.

**Выводы.** Результаты эксперимента подтвердили реализуемость предложенного квазиоптимального способа обработки акустооптического спектроанализатора. Выигрыш соотношения сигнал/шум составил величину около 10 для радиоимпульса с расчетной длительностью, что хорошо согласуется с теоретическими оценками, приведенными в [4].

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку оптимальных алгоритмов обнаружения сигналов в акустооптических спектроанализаторах и исследование возможности их реализации на современной элементной базе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.*
2. *Стрелков А.И., Купченко Л.Ф., Коротков В.В. Дифракционная эффективность акустооптических модуляторов системы спектрального анализа коротких радиолокационных импульсов // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. – Вып. 5(15). – С. 3 – 6.*
3. *Стрелков А.И., Стадник А.М., Коротков В.В. Особенности работы некогерентного акустооптического спектроанализатора при конечном времени регистрации // Радиотехника. – 2001. – Вып. 122. – С. 162 – 168.*
4. *Стрелков А.И., Копылов А.А., Коротков В.В. Особенности обработки сигнала оптического датчика акустооптического спектроанализатора в режиме наблюдения коротких радиоимпульсов // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вып. 3(19). – С. 162 – 171.*

Поступила 13.01.2003

**СТРЕЛКОВ Александр Иванович**, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1968 году окончил ВИРТА ПВО. Области научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико-электронные средства в статистической обработке оптических сигналов.

**КОПЫЛОВ Александр Алексеевич**, канд. техн. наук, начальник НИЛ научного центра при ХВУ. В 1982 году окончил радиофизический факультет ХГУ. Области научных интересов – оптико-электронные системы, оптические информационные технологии.

**КОРОТКОВ Вячеслав Валентинович**, сотрудник СКТБ РТП «Топаз» (г. Донецк). В 1973 году окончил Таганрогский радиотехнический институт. Область научных интересов – статистическая обработка оптических сигналов радиотехнических систем.