

КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА КОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ

Рябкин Ю.В, Карнаух В.В.

Введение. Перспективным направлением построения приемных устройств быстрого распознавания источников радиоизлучения (ИРИ) является применение в их составе акустооптических анализаторов спектра (АОАС). Выделенные объекты ИРИ — это самолетные и корабельные РЛС, а так же РЛС средств ПВО и наземных служб, которые в процессе работы могут перестраивать не только частоту излучения, но и длительность зондирующих импульсов. В комплексах пассивной локации для обнаружения и идентификации современных ИРИ попадают и интересующие нас объекты. При использовании АОАС необходимо учитывать особенности его работы, вызванные конечным временем регистрации радиосигнала. С уменьшением длительности радиоимпульса резко ухудшается соотношение сигнал/шум в АОАС, что приводит практически к невозможному — обнаружение сигнала и измерение его параметров.

Содержательная постановка задач. Снижение эффективности акустооптического преобразования вызвано рядом таких эффектов, как нелинейной зависимости мощности дифрагированного лазерного излучения от длительности радиоимпульса и уменьшения энергии принимаемого полезного сигнала, в следствие расширения его спектра, на один фоточувствительный элемент датчика [1, 2]. Вышеуказанные эффекты приводят к тому, что без дополнительной обработки практически невозможно делать оценки несущей частоты для радиоимпульсов с длительностью меньше некоторой критической величины. Поэтому задача состоит в том, чтобы найти такой способ дополнительной обработки сигнала АОАС для компенсации одновременно как нелинейной зависимости эффективности акустооптического преобразования, так и уменьшения амплитуды спектральных составляющих вследствие расширения спектра сигнала, а также экспериментально проверить его работоспособность с помощью устройства обработки, которое реализует соответствующий этому способу алгоритм обработки сигнала. Такой способ обработки сигнала, по нашему мнению, не рассматривался.

Теоретической основой для разработки алгоритмов обнаружения сигнала может служить связь параметров входных радиосигналов с характеристиками оптических сигналов на выходе АОАС, учитывающая нелинейные эффекты, возникающие при прохождении коротких сигналов [3]. Входной радиоимпульс, представленный в виде зависимости напряженности электрического поля $u(t)$ от времени t внутри акустооптического анализатора превращается в бегущий вдоль пространственной координаты x — апертуры акустооптического модулятора (АОМ) со скоростью V_A акустический сигнал

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

где k — коэффициент эффективности преобразования энергии радиосигнала в энергию акустической волны; $\text{rect}(x, A)$ — функция прямоугольного окна, равного размеру ширины A участка апертуры АОМ, 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 t возникает пространственный оптический сигнал $S(x, t)$, пропорциональный про-

пространственному спектру $s(t, \omega_x)$ сигнала (1), и регистрация которого осуществляется с помощью датчика в виде матрицы из линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС). Таким образом, выходной электрический сигнал в момент времени t для n -го фоточувствительного элемента акустооптического спектроанализатора равен

$$Y(X_n, t) = s_u \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} S^2(X, t) \text{rect}(X - X_1, \Delta X) \delta(X - \Delta X \cdot n) dX dX_1, \quad (2)$$

где S_n — коэффициент преобразования энергии сигнала в напряжение на выходе фоточувствительного элемента; X, X_1 — вспомогательные переменные для описания соответственно дискретизации и усреднения пространственного сигнала; $\text{rect}(X - X_1, \Delta X)$ — функция прямоугольного окна, равного размеру фоточувствительного элемента, определяющая ширину ΔX участка пространственных координат, в пределах которой происходит усреднение пространственного сигнала; $\delta(X - \Delta X \cdot n)$ — дельта-функция Дирака, описывающая пространственную дискретизацию с шагом ΔX .

Реализация квазиоптимальной обработки сигнала. Оптимальным приемником пространственно-временного сигнала является коррелятор входного сигнала с ожидаемым известным сигналом $Y(X_n, t)$, имеющим постоянные параметры [4]. Для оптимальной фильтрации выходного электрического сигнала АОАС от шумов необходимо знать ожидаемый пространственный сигнал $Y(X_n, t)$, который связан со спектром анализируемого радиоимпульса. Реализация оптимального алгоритма фильтрации нестационарного сигнала затруднена по следующим причинам: во-первых, пространственный сигнал на выходе АОАС изменяется во времени; во-вторых, часто заранее неизвестна форма огибающей анализируемого радиоимпульса и его спектр; в-третьих, при наблюдении очень коротких радиоимпульсов не весь оптический сигнал размещается на фоточувствительной части ЛФПЗС. Поэтому, приняв некоторые эмпирические упрощения, проведем квазиоптимальную обработку сигнала АОАС.

Первым упрощением считаем, что огибающая радиоимпульса имеет прямоугольную форму и соответствующий ему акустический сигнал в АОМ тоже имеет прямоугольную форму, тогда выходной пространственный сигнал без обработки можно представить в виде:

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

где $c(x_A(t), a)$ — дифракционная эффективность АОМ; a — амплитуда несущей акустической волны в АОМ; $x_A(t) = A \cdot K_{\text{АОМ}}(t)$ — длина цуга акустической волны, заполняющей апертуру АОМ в момент времени t , с коэффициентом $K_{\text{АОМ}}(t)$ использования апертуры АОМ.

Второе упрощение связано с корректным выбором области рабочего режима, зависящего от X_0 — координата максимума интенсивности световой волны и $\Delta X(\tau_u)$ — размер окна, определяемый размером области пространственных частот, где сосредоточена заданная часть энергии сигнала. Будем считать, что в этой области нелинейные эффекты, связанные с дифракционной эффективностью АОМ невелики и величина дифракционной эффективности просто определяет общий масштабный коэффициент при формировании оптического пространственного сигнала. Это позволяет заменить выражение (3) выражением, которое описывает прямоугольное окно

$$S_{\Pi}(X, t) = c_s(\tau_u) \text{rect}(X, \Delta X(\tau_u)), \quad (4)$$

где $c_s(\tau_u)$ — итоговая эффективность преобразования радиосигнала в оптический сигнал, учитывающая его нелинейную зависимость от τ_u — длительности радиоимпульса.

Таким образом, квазиоптимальная пространственная обработка сигнала с акустооптического спектроанализатора состоит в нахождении пространственного корреляционного интеграла выходного сигнала (2) с опорным сигналом, определяемым выражением (4), с учетом времени τ существования акустической волны в АОАС, $\tau = \frac{A}{V_A} + \tau_u$. Устрой-

ство, реализующее квазиоптимальный алгоритм обработки сигнала, нашло отражение в акустооптическом измерителе частоты [5]. Накопление данных пространственной обработки сигнала важно и для выбора порога при решении задачи оценки вероятности правильного обнаружения при стабилизированной вероятности ложной тревоги.

Реализация и результаты тестирования алгоритма. Выполнена экспериментальная проверка работоспособности алгоритма квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала АОАС. Целью эксперимента является проверка физической реализуемости предложенного способа сигнала и оценка полученного выигрыша соотношения сигнал/шум.

Измерения проводились по блок-схеме установки, приведенной на рис.1. Реализация способа пространственно-временной обработки сигнала АОАС выполнена в виде блока статистической обработки (БСО), представляющего собой коррелятор с функцией в виде прямоугольного окна (4), исходя из длительности радиоимпульса $\tau_u = 0,5$ мкс и меньше. На вход АОАС через коммутаторы К1 и К2, открываемые импульсами от генератора импульсов ГИ, подавались сигналы высокочастотных генераторов ГВ1 и ГВ2, в результате формировались радиоимпульсы длительностью 2 мкс, 1 мкс, 0,5 мкс и 0,3 мкс и частотой повторения 640 мкс. Мощность генератора на используемых частотах составляла 10^{-4} Вт. Два высокочастотных генератора ГВ1 и ГВ2 обеспечивали необходимый диапазон перестройки частот, а два коммутатора К1 и К2 — необходимую степень развязки коммутируемых каналов. Нагрузки коммутаторов принимали проходящее в них радиоизлучение при формировании радиоимпульсов. Регистрация измерений и сравнение сигналов фиксировались с помощью компьютера IBM PC.

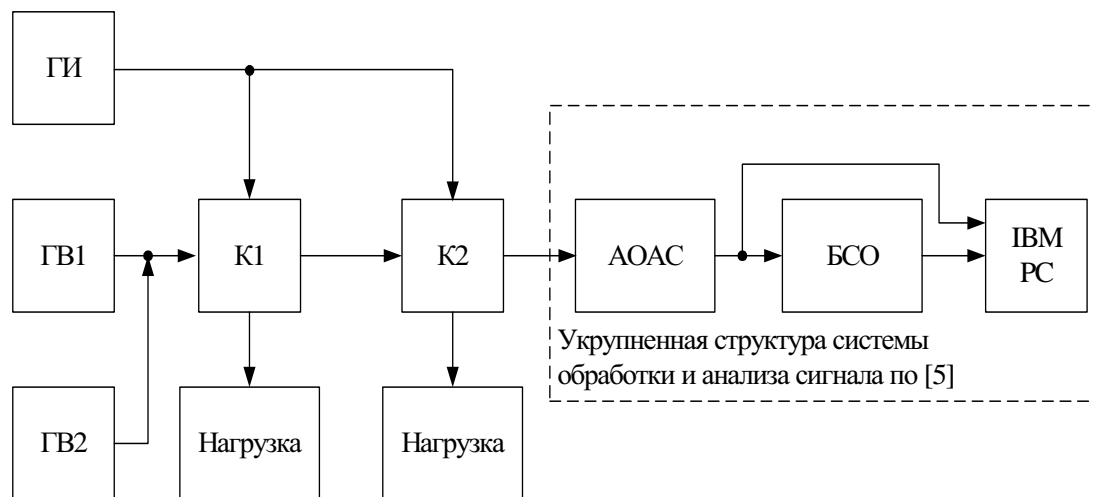


Рис. 1 Блок-схема установки для испытания БСО

В таблице приведены результаты амплитуд сигнала АОАС без использования модуля БСО (верхняя строка) и совместно с модулем БСО (нижняя строка). Анализ результатов эксперимента показывает, что с уменьшением длительности анализируемого радиоимпульса выигрыш от дополнительной обработки сигнала увеличивается. Так, 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 составит около 10 раз. Отсутствие существенного выигрыша при τ_u более 1 мкс объясня-

ется тем, что энергия соответствующего оптического сигнала сосредоточена на нескольких фоточувствительных элементах датчика, определяемых предельным размером дифракционным пятном при заданной апертуре A акустооптического модулятора. Оценить выигрыш при более коротких длительностях ($\tau_{\text{и}} = 0,5$ мкс) наблюдаемых радиоимпульсов без дополнительной обработки сигнала не представляется возможным, так как аппаратура вообще не регистрировала полезный сигнал. На границах рабочего (частоты 1,5 и 2 ГГц), по-видимому, сказываются как потери энергии при преобразовании радиоимпульса в акустический сигнал, так и уширение импульса при его прохождении через акустический облучатель.

F , МГц	1500	1600	1700	1800	1900	2000
U [В]	0,5	2,7	1,3	1,5	2,5	2,5
$\tau=2$ мкс	0,38	4,3	4,8	2,6	4,48	2,09
U [В]	0,3	1,4	0,38	0,7	2,2	1,75
$\tau=1$ мкс	0,32	2,60	3,02	3,88	3,90	3,00
U [В]	0,4	0,5	0,2	0,3	0,25	0,3
$\tau=0,5$ мкс	0,32	1,44	2,16	2,91	2,68	0,8
U [В]	—	—	—	—	—	—
$\tau=0,3$ мкс	—	1,20	0,80	0,70	1,60	—

Выводы

1. На основе анализа временной эволюции пространственного спектра выходных сигналов АОАС предложен способ, повышающий эффективность акустооптического преобразования за счет дополнительной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора путем компенсации одновременно как изменяющегося во времени коэффициента использования апертуры АОМ, так и уменьшения амплитуды спектральных составляющих вследствие расширения спектра сигнала из-за нелинейной зависимости мощности дифрагированного лазерного излучения от длительности радиоимпульса.

2. Приводится алгоритм квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала акустооптического спектроанализатора с учетом времени существования акустической волны в АОАС.

3. Выполнена экспериментальная проверка предложенного способа пространственно-временной обработки сигнала АОАС. Приведены результаты сравнительного эксперимента без дополнительной обработки и с использованием блока БСО. Выигрыш от дополнительной обработки сигнала при длительности огибающей радиоимпульса 0,5 мкс составляет около 10 раз.

The way of acoustic-optic increasing is considering. It considering the nonlinear effects, tract arise at passage of short radio impulses. Quasioptimal algorithm for space-time signal processing by the receiver of non-stationary radio signals. Data of working capacity of algorithm and an estimation of a prize of its use are obtained at short duration observable radio impulses.

1. Корпел А. Акустооптика. — М.: Мир, 1993. — 304 с.
2. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: Сов. радио, 1978. — 306 с.
3. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б. Гусев, С.В. Кулаков, Б.П. Разживин, Д.В. Тигин: Под ред. С.В. Кулакова. — М.: Радио и связь, 1989. — 136 с.
4. Кулаков С.В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. — Л.: Наука, 1978. — 144 с.
5. Патент України №39604 А. Акустооптичний вимірювач частоти. Бюл. №5, 15.06.2001.