

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА АКУСТООПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА В РЕЖИМЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

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

Рассмотрены особенности пространственно-временного сигнала и шума оптического датчика акустооптического спектроанализатора. Показана неэффективность обычной пороговой схемы обработки сигнала при наблюдении коротких радиоимпульсов. Предложена пространственно-временная обработка с переменными во времени характеристиками цифрового фильтра.

1. Введение. Для мониторинга радиообстановки на определенной территории необходимо в реальном масштабе времени определять параметры источников радиоизлучения. Задача усложняется тем, что современные радиолокационные станции в процессе работы могут изменять не только частоту излучения и период следования зондирующих импульсов, но и их длительность. Особые сложности распознавания радиолокационных СВЧ сигналов возникают при анализе очень коротких радиоимпульсов. Быстрое распознавание таких радиоимпульсов возможно с использованием акустооптических спектроанализаторов.

Некоторые вопросы, связанные с особенностями функционирования акустооптических спектроанализаторов в этом режиме, рассматривались в [1, 2]. Так, в [1] учтено конечное время регистрации дифрагированного излучения. В [2] показано, что при разработке новых акустооптических систем спектрального анализа радиолокационных импульсов следует учитывать зависимость дифракционной эффективности акустооптических модуляторов от длительности принимаемых радиолокационных импульсов.

В данной статье учтено наличие шума оптических датчиков и рассмотрено влияние пространственно-временной обработки сигнала линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС) – однорядного массива фоточувствительных элементов в канале акустооптического спектроанализатора на соотношение сигнал/шум при анализе коротких радиоимпульсов.

2. Постановка задачи. Рассмотрим структурную схему акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием, представленную на рис.1 (как и в [1], используются терминология и обозначения из [3]). Цифрами на схеме обозначены: 1 – лазер, 2 – конденсор, 3 – коллиматор, 4 – акустооптический модулятор (АОМ), 5 – фурье-линза, 6 – регистрирующее устройство (оптический датчик). В отличие от [1] в структурную схему добавлено устройство 7 – обработки сигнала. Подробно преобра-

зования сигнала в каждом элементе структурной схемы акустооптического спек-троанализатора описаны в [1]. Ниже приведены выражения, описывающие шум и сигнал акустооптического спектроанализатора на выходе оптического датчика типа ЛФПЗС при наблюдении коротких радиоимпульсов.

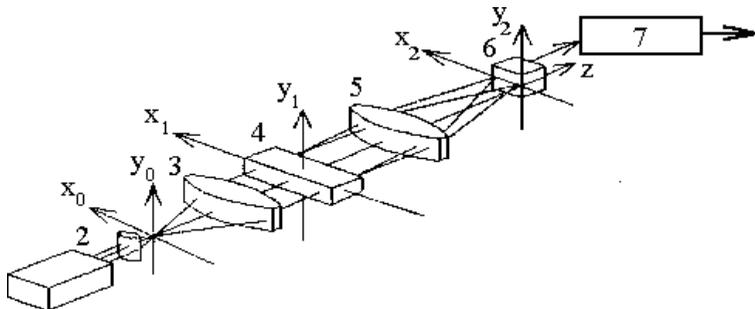


Рис. 1. Структурная схема акустооптического спектроанализатора

Шумы ЛФПЗС можно разбить на две группы: геометрические и случайные. Существуют методы учета и устранения геометрических шумов, которые связаны с неравномерностью темнового тока и чувствительности различных фоточувствительных элементов. Поэтому остановимся на поиске путей ослабления влияния случайных шумов.

Случайные шумы отдельных фоточувствительных элементов вызваны многими факторами. Выделяют следующие шумы, которые описываются равномерной плотностью распределения:

тепловые - связанные с наличием резистивных элементов при конечной температуре;

дробовые - связанные с дискретностью заряда электронов;

радиационные (фотонные) - связанные с флуктуациями излучения фона с температурой T_{Φ} и флуктуациями излучения самого приемника излучения, имеющего температуру $T_{\text{при}}$.

Их дисперсии в полосе частот Δf соответственно равны [4]:

$$\sigma_T^2 = 4kTR\Delta f;$$

$$\sigma_{\text{др}}^2 = 2eIR_{\text{н}}^2 \Delta f;$$

$$\sigma_{\Phi}^2 = 8\varepsilon_T k\sigma A \Delta f (T_{\Phi}^5 + T_{\text{при}}^5),$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура приемника; R – его сопротивление, e – заряд электрона; I – среднее значение силы тока; Δf – полоса частот; ε_T – коэффициент теплового излучения (поглощения) чувствительного слоя ФЧЭ; σ – постоянная закона Стефана - Больцмана; T_{Φ} – температура фона - источника излучения, принятого за черное тело; $T_{\text{при}}$ – температура приемника излучения.

Кроме шумов с равномерной плотностью распределения существу-

ет еще так называемый $1/f$ шум, плотность распределения которого обратно пропорциональна частоте. Этот шум часто называют *токовым* шумом. Природа этого шума до конца не исследована, он вызывается несколькими причинами, и имеются несколько гипотез для его объяснения. На практике для дисперсии этого шума в полосе частот Δf принимают следующее выражение:

$$\sigma_i^2 = A_T I^2 R^2 \Delta f / f,$$

где A_T - численная постоянная, значение которой зависит от типа фотоэлемента.

Так как фотонный шум в значительной мере зависит от параметров источника излучения и условий работы приемника излучения, то он определяет предельную чувствительность ФЧЭ. Часто идеальным приемником излучения считают тот, у которого все шумы по сравнению с радиационными (фотонными) незначительны.

Если отдельные виды шумов некоррелированы, то дисперсия суммарного шума равна

$$\sigma_{ш}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{др}^2 + \sigma_{ф}^2 + \sigma_i^2.$$

В акустооптическом спектроанализаторе после Фурье-линзы 5 (рис.1) шкала частот взаимно однозначно отображается на шкалу пространственных координат (распределение вдоль оси x_2 амплитуды и фазы монохроматического излучения на выходе Фурье-линзы соответствует распределению амплитуд и фаз спектральных составляющих радиоимпульса). При регистрации после Фурье-линзы 5 датчиком типа ЛФПЗС происходит некогерентное преобразование выходного пространственного светового распределения в пропорциональный световой энергии электрический сигнал датчика 6. Фазовая информация теряется и полезный пространственный сигнал на выходе датчика представляет собой величину, пропорциональную квадрату амплитудно-частотного спектра анализируемого радиоимпульса. На полезный сигнал накладываются пространственные шумы датчика. Если пренебречь мультипликативными шумами ФЧЭ и рассматривать только аддитивные некоррелированные шумы, то шум можно считать эргодическим процессом с энергией шумового пространственного сигнала

$$E_{ш} = \sigma_{ш}^2. \quad (1)$$

При уменьшении длительности импульса его спектр расширяется, а амплитуда спектральных составляющих радиоимпульса уменьшается. Так для радиоимпульса с прямоугольной огибающей длительностью τ_i с частотой заполнения ω_0 и постоянной интенсивностью амплитудный спектр описывается выражением:

$$S_0(\omega, \tau_i) = \frac{A \cdot \tau_i}{2} \left[\frac{\sin\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2}\right)}{\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_i}{2}\right)} + \frac{\sin\left(\frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2}\right)}{\left(\frac{(\omega + \omega_0)\tau_i}{2}\right)} \right]. \quad (2)$$

Соответствующий график, иллюстрирующий изменение амплитуд спектральных составляющих при уменьшении длительности радиоимпульса τ по отношению к импульсу, имеющему длительность τ_0 , равную времени прохождения фронта акустического импульса через апертуру АОМ, представлен на рис. 2.

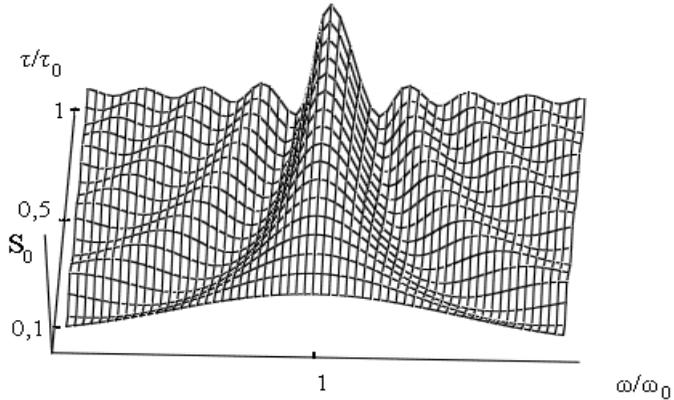


Рис. 2. Зависимость спектра радиоимпульса от его длительности

3. Пространственная обработка сигнала оптического датчика и расчетные соотношения для сигнала и шума. Обычно в акустооптических спектроанализаторах сигнал обнаруживают пороговым устройством, на вход которого последовательно подают пространственные отсчеты с фоточувствительных элементов ЛФПЗС. Для фоточувствительного элемента (номер n) такой отсчет сигнала описывается выражением

$$U_n = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(\omega, \tau_i)|^2 \cdot \text{rect}(\Delta x_2, \omega - x_2) dx_2 \delta(\omega - \Delta\omega \cdot n) d\omega, \quad (3)$$

где $\text{rect}(\Delta x_2, \omega - x_2)$ – функция прямоугольного окна, равного размеру фоточувствительного элемента, определяющая ширину Δx_2 участка пространственных координат, в пределах которой происходит усреднение пространственного сигнала.

Максимальное из отношений мощностей сигнала и шума для от-

$$Q_n(\tau_i) = \max \left(\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(\omega, \tau_i)|^2 \cdot \text{rect}(\Delta x_2, \omega - x_2) dx_2 \delta(\omega - \Delta \omega \cdot n) d\omega \right|^2}{\sigma_{ш}^2} \right) \approx \frac{|S_0(\omega_0, \tau_i)|^4}{\sigma_{ш}^2} \quad (4)$$

при достаточно малой длительности τ_i анализируемого радиоимпульса фактически определяется мощностью пространственного отсчета ЛФПЗС, соответствующего несущей частоте ω_0 .

Рассмотрим изменение во времени полезного пространственного сигнала на выходе акустооптического спектроанализатора. Для этого предварительно введем параметр, который назовем коэффициент использования апертуры акустооптического модулятора $K_{АОМ}$. Этот параметр показывает, какая часть апертуры акустооптического модулятора заполнена полезной акустической волной, на которой собственно происходит дифракция лазерного луча. Зависимость $K_{АОМ}$ от времени при различных длительностях радиоимпульса изображена на рис. 3, а и 3, б. При этом на рис. 3, б показана эта зависимость для пяти фиксированных длительностей радиоимпульса: $0, 1\tau_0; 0,3\tau_0; 1\tau_0; 3T_A; 10\tau_0$, где τ_0 – время прохождения фронта акустического импульса через апертуру АОМ. Следует обратить внимание на то, что даже при длительностях радиоимпульса, превышающих τ_0 , вначале наблюдается увеличение $K_{АОМ}$ от нуля до единицы, а в конце наоборот – уменьшение. При длительностях радиоимпульса, меньших τ_0 , увеличение $K_{АОМ}$ наблюдается от нуля до максимальной величины, равной отношению длительности импульса к τ_0 , а в конце соответствующее уменьшение. Это приводит к тому, что изменение во времени пространственного сигнала ЛФПЗС имеет вид, представленный на рис. 4, а – 4, д.

При уменьшении длительности радиоимпульса амплитуда гармоники несущей частоты уменьшается, следовательно ухудшается и соотношение сигнал/шум. Увеличить энергию полезного сигнала можно проведя пространственную обработку сигнала ЛФПЗС – например, путем суммирования отсчетов с некоторыми весовыми коэффициентами ($h_0, h_1, h_2, \dots, h_N$) в пределах некоторого скользящего окна Δx_2 . Такая обработка эквивалентна цифровой фильтрации с импульсной характеристикой эквивалентного фильтра ($h_0, h_1, h_2, \dots, h_N$) длиной $N = \Delta x_2 / \Delta x_2$.

При этом энергия сигнала

$$E_m = \left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_n, \tau_i)^2 \cdot h_{m-n} \right|^2$$

увеличивается за счет суммирования с соответствующими весовыми коэффициентами сигналов спектральных составляющих, которые попали в скользящее окно.

Как известно, энергию шума при такой обработке можно вычислить исходя из того, что для шума отдельные пространственные отсчеты некоррелированы, поэтому

$$\sigma_m^2 = \sum_{m=0}^N \sigma_{ш}^2 \cdot h_m^2 = \sigma_{ш}^2 \cdot \sum_{m=0}^N h_m^2.$$

Тогда отношение энергий сигнала и шума после пространственной обработки равно:

$$Q = \frac{\left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_n, \tau_i)^2 \cdot h_{m-n} \right|^2}{\sigma_{ш}^2 \cdot \sum_{m=0}^N h_m^2}. \quad (5)$$

А коэффициент шума устройства обработки сигнала акустооптического спектроанализатора

$$F = \frac{(P_c/P_{ш})_{вх}}{(P_c/P_{ш})_{вых}}$$

равен с учетом (4) и (5):

$$F(N) = \frac{|S_0(\omega_0, \tau_i)|^4 \cdot \sum_{m=0}^N h_m^2}{\left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_n, \tau_i)^2 \cdot h_{m-n} \right|^2}. \quad (6)$$

В случае, когда импульсная характеристика представляет собой прямоугольное окно (все весовые коэффициенты одинаковы и равны единице) выражение (6) принимает вид:

$$F_1(N) = \frac{|S_0(\omega_0, \tau_i)|^4 \cdot N}{\left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_n, \tau_i)^2 \right|^2}. \quad (7)$$

4. Численные расчеты и обсуждение. Как видно из рисунков 4, а - 4, д при уменьшении длительности радиоимпульса возникают сложности с определением несущей частоты анализируемого сигнала так как его спектр расширяется, а амплитуда спектральных составляющих уменьшается.

Уменьшение амплитуды спектральных составляющих приводит к неэффективности обычной пороговой схемы для обнаружения короткого радиоимпульса. Для улучшения характеристик обнаружения необходимо проводить пространственно-временную обработку сигнала ЛФПЗС на выходе акустооптического спектроанализатора. На рис. 5 представлены результаты расчета выигрыша соотношения сигнал/шум $1/F_1$ после устройства обработки сигнала акустооптического спектроанализатора при наиболее простом случае, когда импульсная характеристика устройства обработки сигнала представляет собой прямоугольное окно с переменным размером импульсной пространственной характеристики N . Из выражения (7) следует, что при очень коротком радиоимпульсе (рис. 4, д) можно в первом приближении считать, что $S_0(\omega_n, \tau_i) = S_0(\omega_0, \tau_i)$. Тогда

$$\frac{1}{F_1}(N) = \frac{\left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_n, \tau_i)^2 \right|^2}{|S_0(\omega_0, \tau_i)|^4 \cdot N} \approx \frac{\left| \sum_{n=0}^N S_0(\omega_0, \tau_i)^2 \right|^2}{|S_0(\omega_0, \tau_i)|^4 \cdot N} \approx N.$$

Однако из рис. 5 видно, что с увеличением N выигрыш соотношения сигнал/шум достигает некоторого максимума и затем уменьшается. Уменьшение обусловлено спадом спектральной плотности пространственного оптического сигнала после АОМ и поэтому пространственное накопление приводит к накоплению энергии шума, а не энергии полезного сигнала.

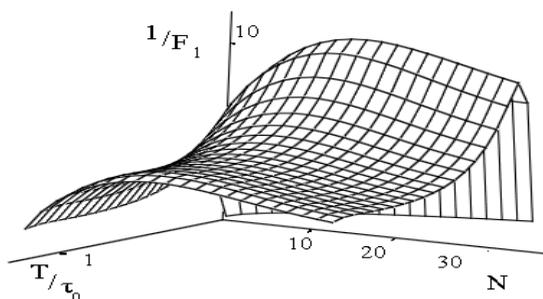


Рис. 5. Выигрыш соотношения сигнал/шум после обработки сигнала

Таким образом длина импульсной характеристики и ее весовые коэффициенты должны быть согласованы со спектром анализируемого

радиоимпульса. Более того, для оптимальной пространственно - временной обработки необходимо учитывать также динамику во времени переходных процессов пространственного оптического сигнала после акустооптического модулятора.

5. Заключение. В данной работе рассмотрено влияние пространственно-временной обработки сигнала линейного массива фоточувствительных элементов в канале акустооптического спектроанализатора на соотношение сигнал/шум при анализе коротких радиоимпульсов. Получены выражения для оценки коэффициента шума устройства при пространственной линейной обработке в общем случае. Показано, что даже в случае наиболее простой обработки – цифровой фильтрации выходного сигнала фильтром с импульсной характеристикой в виде прямоугольного фильтра выигрыш соотношения сигнал/шум может составлять в зависимости от длительности анализируемого радиоимпульса и длины импульсной характеристики в 10 и более раз. Для улучшения характеристик обнаружения следует оптимизировать вид пространственной импульсной характеристики с учетом динамики изменения во времени пространственного сигнала ЛФПЗС на выходе акустооптического спектроанализатора.

Полученные результаты могут быть использованы при создании методики синтеза современных акустооптических спектроанализаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Стрелков А.И., Купченко Л.Ф., Коротков В.В. Дифракционная эффективность акустооптических модуляторов системы спектрального анализа коротких радиолокационных импульсов // *Система обробки інформації* . - Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, – 2001. – Вып. 5(15) . – С. 3 - 6.
3. *Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова* . – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
4. Якушенко Ю.Г. *Теория и расчет оптико - электронных приборов* – М.: Машиностроение, 1989. – С. 110 - 112.

Поступила 30.04.2002

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

СТРЕЛКОВ Александр Иванович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра ХВУ. В 1965 году окончил ВИРТА ПВО. Области научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико - электронные средства в статистической обработке оптических сигналов.

КОРОТКОВ Вячеслав Валентинович, сотрудник СКБ РТП «Топаз» (г. Донецк). Область научных интересов – статистическая обработка оптических сигналов радиотехнических систем.