

## ЧАСТОТНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В НЕКОГЕРЕНТНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРАХ

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, к.ф.-м.н. А.М. Стадник, В.В. Марченко

*Исследовано влияние конечного времени регистрации на разрешающую способность некогерентных акустооптических анализаторов с пространственным интегрированием. Получены аналитические выражения и проведены численные расчёты для выходного сигнала при двух импульсах с прямоугольной огибающей на входе.*

**1. Введение.** Широкое применение оптических методов при анализе изображений, радиолокационных сигналов, геофизических и других данных [1 – 3] обусловлено уникальными возможностями этих методов: параллельностью обработки, высокой частотой и скоростью оптических сигналов и т.д.

Эти возможности реализованы, в частности, в современных акустооптических спектроанализаторах, отличающихся простотой конструкции и параллельной обработкой сигналов в широкой полосе частот и практически в реальном масштабе времени [4 – 6].

Полное использование всех достоинств беспоискового спектрального анализа и расширение полосы одновременно анализируемых частот в акустооптических спектроанализаторах обуславливают необходимость более глубокого анализа их разрешающей способности. Систематическое изложение теоретических аспектов работы акустооптических анализаторов спектра представлено в [3, 5].

В большинстве работ, посвящённых рассмотрению оптических спектроанализаторов, время регистрации предполагается бесконечно большим [3], что неадекватно описывает многие реальные схемы и устройства. В статье [7] это продемонстрировано на примере выходного сигнала фотодетектора в некогерентном спектроанализаторе с пространственным интегрированием для одиночного входного импульса. Кроме того, речь идет, как правило, о частотном разрешении монохроматических сигналов [3, 5], хотя понятно, что разрешение несущих частот импульсных сигналов будет зависеть от соотношения продолжительности анализируемых импульсов между собой и с другими характерными временами задачи.

Целью настоящей статьи является оценка эффектов конечного времени регистрации и длительности входных импульсов на разрешающую способность некогерентных акустооптических спектроанализаторов с

пространственным интегрированием на примере двух одиночных входных импульсов с различными несущими частотами.

**2. Основные соотношения и формулировки.** Напомним, для полноты изложения, основы анализа акустооптических анализаторов спектра с пространственным интегрированием. Структурная схема анализатора [3, 7] представлена на рис. 1, где обозначены: 1 – лазер, 2 – конденсатор, 3 – коллиматор, 4 – акустооптический модулятор (АОМ), 5 – фурье-линза, 6 – регистрирующее устройство и изображены используемые системы координат  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$ .

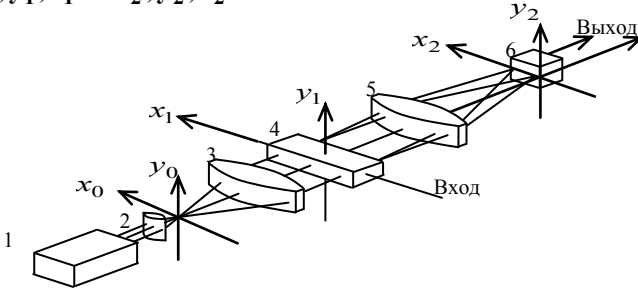


Рис. 1. Структурная схема акустооптического спектроанализатора

Конденсатор и коллиматор преобразуют излучаемую лазером монохроматическую волну  $\exp[i(\omega_L t - k_L z_1)]$  в падающую под углом  $\theta_i$  на АОМ плоскую волну  $E_0(x_1, t) = r(x_1) \exp[i(\omega_L t - k_L z_1 + k_L x_1 \operatorname{tg} \theta_i)]$  с заданной

$$\text{апертурой } r(x_1) = \begin{cases} 1, & |x_1| \leq D/2; \\ 0, & |x_1| > D/2. \end{cases}$$

На вход анализатора поступает радиосигнал  $s(t)$ , который затем преобразуется в бегущую акустическую волну  $r(x_1) s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right)$ , распространяющуюся со скоростью  $v$ . В линейном приближении поле световой волны первого дифракционного порядка представляется в виде

$$E_1(x_1, t) = A r(x_1) s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right) \exp[i(\omega_L t - k_L z_1 + k_L x_1 \operatorname{tg} \theta_i)], \quad (1)$$

где  $A$  характеризует модулирующее воздействие акустической волны на проходящее через АОМ лазерное излучение.

В выходной плоскости анализатора, совпадающей с задней фокальной плоскостью линзы 5, поле записывается как

$$E_2(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 E_1(x_1, t) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda F} x_1 x_2\right), \quad (2)$$

где  $F$  - фокусное расстояние линзы,  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения.

Используя разложение (1), формулу (2) можно преобразовать к виду

$$E_2(\omega_x, t) = Av \exp(-i\omega_x T / 2) \int_0^T dt \exp(i\omega_x \tau) \delta(t - \tau), \quad (3)$$

где опущен несущественный в дальнейшем множитель  $\exp[i(\omega_L t - k_L z_1)]$  и

введено обозначение  $\omega_x = v\left(\frac{2\pi}{\lambda F} x_2 + k_L \operatorname{tg}\theta_1\right)$ , а  $T = \frac{D}{v}$  есть длительность

временной выборки, соответствующей световой апертуре  $D$ . В формуле (3) и всюду ниже явно отражена зависимость поля  $E_2$  от  $x_2$  посредством  $\omega_x = \omega(x_2)$ .

Как и в предыдущей работе [7], будем рассматривать некогерентное преобразование выходного светового распределения в электрический сигнал, пропорциональный интегралу по времени от его интенсивности

$$u(\omega_x, T_R) = \int_0^{T_R} dt |E_2(\omega_x, t)|^2, \quad (4)$$

где  $T_R$  - время регистрации, отсчитываемое от момента  $t = 0$ .

**3. Разрешение импульсов с прямоугольной огибающей.** Пусть на вход анализатора одновременно поступают два импульса прямоугольной формы одинаковой единичной амплитуды, но с различными несущими частотами  $\omega_a$ , длительностями  $\tau_a$  и временами задержки  $t_a$  ( $a = 1, 2$ ):  $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ , где

$$s_a(t) = \begin{cases} 0, & t < t_a; \\ \sin(\omega_a(t - t_a)), & t_a \leq t \leq t_a + \tau_a; \\ 0, & t > t_a + \tau_a. \end{cases} \quad (5)$$

Подстановка (5) в (3) дает

$$E_2(\omega_x, t) = E_2^{(1)}(\omega_x, t) + E_2^{(2)}(\omega_x, t), \quad (6)$$

где слагаемое  $E_2^{(a)}(\omega_x, t)$ , соответствующее отклику на  $a$ -й входной импульс ( $a = 1, 2$ ), в случае временной апертуры  $T$ , меньшей длительности импульса  $\tau_a$ , с точностью до несущественного для дальнейшего рассмотрения множителя  $Av \exp(-i\omega_x T / 2)$  задается следующими выражениями:

при  $T_R < t_a$

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = 0; \quad (7)$$

при  $t_a \leq T_R < t_a + T$

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(t - t_a, t - t_a, t - t_a); \quad (8)$$

при  $t_a + T \leq T_R < t_a + \tau_a$

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(T, 2(t - t_a) - T, T); \quad (9)$$

при  $t_a + \tau_a \leq T_R < t_a + \tau_a + T$

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(t - t_a - \tau_a + T, t - t_a + \tau_a - T, \tau_a + T - t + t_a); \quad (10)$$

при  $T_R \geq t_a + \tau_a + T$

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = 0. \quad (11)$$

В формулах (8-10) для сокращения записи введено обозначение для функции трех переменных

$$e_a(s_1, s_2, s_3) = e^{\frac{i\omega_x s_1}{2}} \left[ e^{\frac{i\omega_a s_2}{2}} \frac{\sin(\omega_a^- s_3 / 2)}{\omega_a^-} - e^{-\frac{i\omega_a s_2}{2}} \frac{\sin(\omega_a^+ s_3 / 2)}{\omega_a^+} \right],$$

где  $\omega_a^\pm = \omega_x \pm \omega_a$ .

Таким образом, в силу (4) и (6), суммарный регистрируемый сигнал можно записать в виде

$$u(\omega_x, T_R) = u_1(\omega_x, T_R) + u_2(\omega_x, T_R) + u_{12}(\omega_x, T_R), \quad (12)$$

где  $u_a(\omega_x, T_R) = \int_0^{T_R} dt |E_2^{(a)}(\omega_x, t)|^2$  представляют собой выходной сигнал

при наличии на входе только  $a$ -го импульса, а третье слагаемое

$$u_{12}(\omega_x, T_R) = 2 \operatorname{Re} \left[ \int_0^{T_R} dt E_2^{(1)}(\omega_x, t) \overline{E_2^{(2)}(\omega_x, t)} \right] \quad (13)$$

возникает как результат интерференции первых двух (черта сверху означает комплексное сопряжение).

Выражения для  $u_a(\omega_x, T_R)$  в случае временной апертуры  $T$ , меньшей длительности каждого из импульсов  $\tau_i$ , приведены в предыдущей работе авторов [7]. Явные выражения для  $u_{12}(\omega_x, T_R)$  получаются после подстановки в (13) формул (7-11) и здесь не приводятся только в силу их громоздкости, поскольку учитывают все возможные варианты взаимного положения по оси времени этапов вхождения в апертуру, ее полного заполнения и выхода из апертуры каждого из импульсов. Физическая трактовка этих вы-

ражений аналогична приведенной в [7] для величин  $u_a(\omega_x, T_R)$ .

Таким образом, совокупность формул (7-13) определяет выходной сигнал спектроанализатора при поступлении на его вход двух импульсов прямоугольной формы с различными несущими частотами, длительностями и временами задержки.

**4. Численные расчеты и обсуждение.** Наиболее существенные качественные и количественные характеристики частотного разрешения можно видеть уже на примере двух импульсных сигналов, отличающихся только несущими частотами.

При проведении численных расчетов принималось, что длительности входных импульсов  $\tau_1 = \tau_2 = \tau = 1000$ , а величина временной апертуры  $T = 800$  (время измерялось в условных единицах, которые определялись соотношением  $\omega_1 = 1$ ). Задержки обоих импульсов без потери общности полагались равными  $t_1 = t_2 = 0$ , а временная эволюция выходного сигнала рассматривалась на интервале  $0 \leq T_R \leq \tau + T$ , что позволяло выявить все особенности временного хода, поскольку затем сигнал выходил на стационарное значение [7].

Рис. 2 иллюстрирует результаты расчетов временной эволюции зависимости выходного сигнала  $u(\omega_x, T_R)$  от величины  $\omega_x$ , пропорциональной координате  $x_2$  для относительной расстройки несущих частот  $\varepsilon = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_1 = 0,02$ .

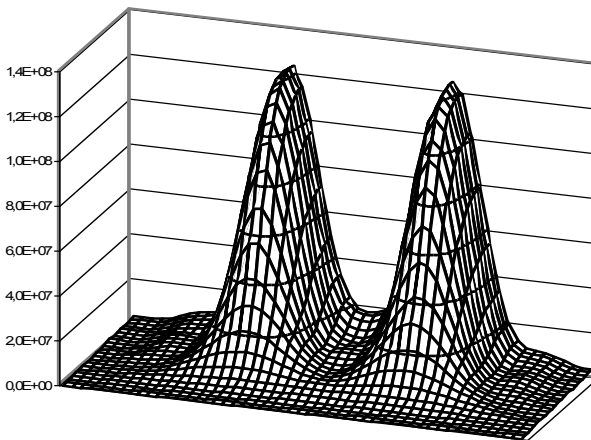


Рис. 2. Выходной сигнал спектроанализатора при большой расстройке несущих частот входных импульсов

Ось  $x$  соответствует величине  $\omega_x$ , а ось  $y$  – величине  $T_R$ , причем ле-

вый пик на этом и последующих рисунках представляет входной импульс с несущей  $\omega_1$ , правый – импульс с несущей  $\omega_2$ .

Как видно из рис. 2, при такой величине расстройки  $\epsilon$  наличие интерференционного члена в выражении (12) практически несущественно, и импульсы достоверно различимы уже после этапа заполнения ими апертуры АОМ.

На рис. 3 представлены результаты расчетов выходного сигнала  $u(\omega_x, T_R)$  для в два раза меньшей, чем на рис. 2, расстройки  $\epsilon = 0,01$  при неизменных остальных параметрах. Сопоставление этих рисунков показывает, что при данной величине расстройки уверенное разделение импульсов возможно лишь при достаточно большом (близком к этапу выхода на стационарное значение) времени наблюдения.

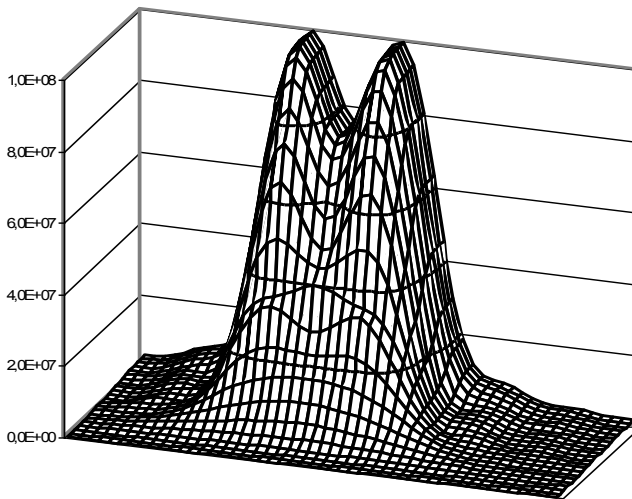


Рис. 3. Выходной сигнал при умеренной расстройке несущих частот

Кроме того, если для расстройки  $\epsilon = 0,02$  уже в самом начале регистрируются два (пусть и слабо различимых) импульса, а по мере роста  $T_R$  их различие увеличивается, то для  $\epsilon = 0,01$  сначала оба импульса абсолютно неразличимы (выглядят как одно целое) и лишь в процессе регистрации, если ее время достаточно велико, происходит все более полное их разделение.

Данные расчетов на рис. 3 также иллюстрируют слабую эффективность алгоритма различения сигналов при среднем (по критерию Релея) разрешении выходных импульсов, основанном на фильтрации интерференционного члена в (12) посредством пропускания через низкочастотный (по сравнению с частотой биений, пропорциональной разности

$\omega_2 - \omega_1$ ) фильтр. Поскольку при таких значениях расстройки  $\epsilon$  интерференционный член сравним по величине с откликами от отдельных импульсов и дает сравнимый с ними вклад в суммарный выходной сигнал, то его фильтрация приведет к снижению уровня полезного сигнала и, соответственно падению эффективности такого алгоритма.

Результаты расчетов, представленные на рис. 4, отличаются от двух предыдущих еще большей величиной расстройки:  $\epsilon = 0,005$ . Характер изменения выходного сигнала такой же, как и на рис. 3: вначале оба импульса как единый неразличимый, и лишь в процессе регистрации кривая зависимости  $u(\omega_x, T_R)$  от  $\omega_x$  становится двугорбой. Однако даже при выходе сигнала на стационарное значение эта двугорбость невелика, и о наличии второго импульса на фоне первого можно лишь косвенно судить о повышенной по сравнению с предыдущим рисунком суммарной амплитуде выходного сигнала.

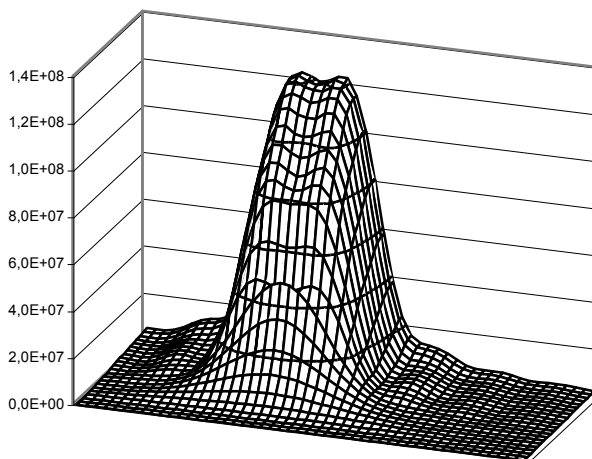


Рис. 4. Выходной сигнал при малой расстройке несущих частот

Впрочем, как легко видеть, суммарный сигнал от двух полностью идентичных импульсов превышает сигнал от одиночного импульса только в четыре раза, чего может оказаться недостаточно в устройствах, параметры которых подобны использованным при расчетах в данной статье.

Таким образом, для различения несущих частот входных импульсов при средних и малых величинах расстройки общим необходимым условием является достаточно большое (по сравнению с суммарной продолжительностью входного импульса и временной апертуры спектроанализатора) время регистрации.

**5. Заключение.** В данной работе исследовано влияние конечного времени регистрации на разрешающую способность некогерентных аку-

стооптических анализаторов. Получены аналитические выражения для выходного сигнала при двух импульсах с прямоугольной огибающей на входе. Результаты численного моделирования могут быть использованы при обосновании путей повышения разрешающей способности некогерентных акустооптических анализаторов с пространственным интегрированием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Парыгин В.Н., Балакий В.И. Оптическая обработка информации.* – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 142 с.
2. *Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации.* – М.: Высш. шк., 1988. – 237 с.
3. *Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова.* – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
4. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение.* – М.: Сов. радио, 1978. – 112 с.
5. *Кулаков С.В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов.* – Л.: Наука, 1978. – 144 с.
6. *Белошицкий Л.П., Комаров В.Н., Крекотень Б.П., Сапожников Б.Т. Акустооптические анализаторы спектра сигналов // Зарубежная радиоэлектроника.* – 1981. – № 3. – С. 51 - 70.
7. *Стрелков А.И., Стадник А.М., Коротков В.В. Особенности работы некогерентного акустооптического спектроанализатора при конечном времени регистрации // Радиотехника (Харьков).* – 2001. – Вып. 122. – С. 162 - 168.

Поступила 8.07.2002

**СТРЕЛКОВ Александр Иванович**, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра при Харьковском военном университете. В 1965 году окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО. Область научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико-электронные средства обработки оптических сигналов.

**СТАДНИК Александр Михайлович**, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института радиофизики и электроники НАН Украины. В 1971 году окончил физфак ХГУ. Область научных интересов – распространение волн в случайно-неоднородных средах, математические методы оптимальной обработки сигналов, дистанционное зондирование Земли.

**МАРЧЕНКО Василий Васильевич**, сотрудник СКБ «Топаз» (г. Донецк). Область научных интересов – статистическая обработка оптических сигналов в радиотехнических системах.

---