

## **ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ СПЕКТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ НА БЛИЗКИХ ЧАСТОТАХ**

А.И. Стрелков<sup>1</sup>, Т.А. Стрелкова<sup>2</sup>, Е.И. Жилин<sup>2</sup>, В.В. Марченко<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил,

<sup>2</sup>Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков,

<sup>3</sup>СКБ «Топаз», Донецк)

*Рассматриваются вопросы сверхрелеевого пространственного разрешения оптических сигналов в акустооптическом анализаторе спектра радиосигналов. Для разрешения оптических сигналов, расстояние между геометрическими центрами которых в плоскости фотоприемника акустооптического анализатора спектра меньше рэлеевского предела, предложен метод автокомпенсации шумового фона с отдельным компенсационным каналом.*

*пространственное разрешение, оптический сигнал, акустооптический анализатор спектра, метод автокомпенсации шумового фона*

**Введение.** Спектральный анализ радиосигналов является на сегодняшний день одним из самых мощных инструментов для фундаментальных и прикладных исследований в области радиолокации, радиосвязи, радионавигации и других смежных областях науки и техники. Особое место среди техники спектрального анализа радиосигналов, в силу ряда преимуществ, занимают акустооптические анализаторы спектра (АОАС) обеспечивающие построение мгновенного спектра анализируемых радиосигналов, беспойсковый панорамный анализ многомерных сигналов, высокую скорость проведения спектрального анализа.

Наблюдаемое в последние десятилетия стремительное увеличение количества пользователей радиочастотного пространства и ограниченность используемого частотного ресурса остро ставит вопрос о модернизации существующих систем спектрального анализа с целью увеличения их частотного разрешения.

Используемые в АОАС принципы спектрального анализа позволяют сформулировать задачу повышения частотного разрешения радиосигналов, как задачу о пространственном разрешении оптических сигналов, расстояние между центрами которых в плоскости фотоприемника меньше рэлеевского предела.

Обобщенная структурная схема АОАС подробно описана в [1] и представлена на рис. 1. Источник когерентного излучения совместно с формирующей оптической системой создает плоскую световую волну, падающую под углом Брэгга на акустооптический модулятор (АОМ), в котором распространяется бегущая ультразвуковая волна, инициированная входным электрическим сигналом частотой  $\omega$  (анализируемый сигнал). Плоская световая волна, падающая на АОМ, дифрагирует на бегущей ультразвуковой волне. В дальней зоне образуется дифракционная картина, состоящая из ряда максимумов и минимумов. Фурье преобразователь (интегрирующий объектив) выполняет пространственно-частотное Фурье-преобразование оптического сигнала, перенося формируемое изображение спектра радиосигнала из дальней зоны в фокальную плоскость, где размещен регистрирующий оптическое излучение фотоприемник. При этом пространственное распределение интенсивности светового потока в плоскости фотокатода соответствует мгновенному спектру входного электрического сигнала. Таким образом, задача частотного разрешения регистрируемых АОА радиосигналов может быть сведена к задаче пространственного разрешения оптических сигналов в фокальной плоскости Фурье преобразователя.

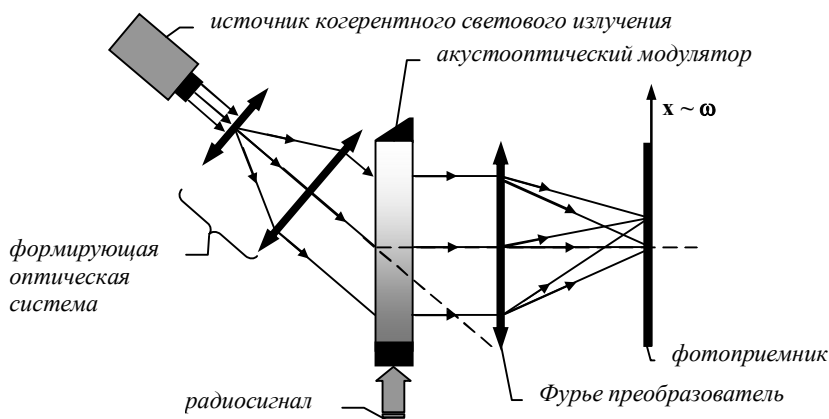


Рис. 1. Структурная схема АОАС радиосигналов

На сегодняшний день известны некоторые частные решения задачи сверхрэлеевского разрешения сигналов, описанные в [2, 3]. Например, в работе [2] рассмотрены алгебраические методы разрешения  $M$  сигналов, различие по времени задержки которых меньше рэлеевского предела. Данные методы основаны на аппроксимации огибающей сигнала функ-

цией  $\sin^M \tilde{x}_M$ . При решении задач дальнометрии в импульсной радиолокации применение для описания сигналов детерминированной функции вполне оправдано. Однако такой подход не в полной мере отображает статистическую структуру оптических сигналов, что описано в [4]. В работе [3] рассматриваются вопросы синтеза и асимптотического анализа алгоритма совместного оценивания местоположения  $Q$  объектов по группированной выборке наблюдений. Решение задачи основано на использовании метода максимального правдоподобия при условии кругового нормального распределения ошибок координат попадания фотонов в фокальной плоскости оптической системы. Принятая в работе гауссовская аппроксимация функции структурной модели некогерентного рассеяния приближенно определяет пространственно-амплитудное распределение оптического сигнала и, как показано в [5], может быть использована для предварительных расчетов. Более полное описание пространственно-амплитудной структуры формируемых изображений может быть получено при совместном учете как волновых, так и корпускулярных свойств оптического сигнала.

В общем случае пространственное распределение интенсивности светового потока в плоскости фотокатода приемника оптического излучения (рис. 1), описанное с помощью методов волновой теории света и теории акустооптического взаимодействия может быть представлено выражением, записанным в виде [6]

$$I(x) = I_0 \left[ \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right]^2, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность сигнала, в направлении освещающего пучка;  $a = tb$ ;  $\tau$  – длительность радиоимпульса;  $b$  – размерный коэффициент пропорциональности, учитывающий параметры оптической системы;  $x_0$  – смещение максимума интенсивности в плоскости фотокатода.

С другой стороны, световой поток может быть представлен с точки зрения корпускулярной теории света, как поток частиц фотонов, где интенсивность светового потока пропорциональна среднему значению количества фотонов  $I \sim \bar{n}$ . Фотокатод осуществляет преобразование потока квантов света в поток носителей и тогда используя (1) можно записать [7], что

$$\bar{n}(x) = \bar{N}_0 \left[ \frac{\sin a(x - x_0)}{a(x - x_0)} \right]^2, \quad (2)$$

где  $\bar{N}_0$  – среднее число фотонов в световом потоке интенсивностью  $I_0$ .

При этом, поток носителей зарядов, как и поток фотонов, являются случайными и подчиняются, согласно [4, 8], закону Пуассона с плотность вероятности появления  $n_i$  фотонов на площадке  $\Delta S_i$   $i$ -элемента разрешения фотокатода:

$$P(n_i) = \prod_{i=1}^v \frac{(\bar{n}_i T_n \Delta S_i)^{n_i}}{n_i!} e^{-(\bar{n}_i T_n \Delta S_i)}, \quad (3)$$

где  $\bar{n}_i$  – средняя скорость счета носителей в  $i$ -м элементе разрешения фотоприемника;  $T_n$  – время накопления (экспозиция).

Исходя из корпускулярного описания светового потока, пространственное распределение интенсивности оптического сигнала в плоскости фотокатода в конкретный момент времени будет случайным (рис. 2). В этом случае выражение (1), полученное на основе волновой теории описывает пространственное распределение среднего значения амплитуды сигнала в плоскости фотокатода, достижимое лишь при достаточно большом времени накопления (рис. 2). В отличие от мгновенного изображения, при длительной экспозиции происходит сглаживание интенсивности сигнала за счет его накопления на элементах разрешения фотокатода. При этом положение максимумов интенсивности не случайно и определяется спектром радиосигнала.

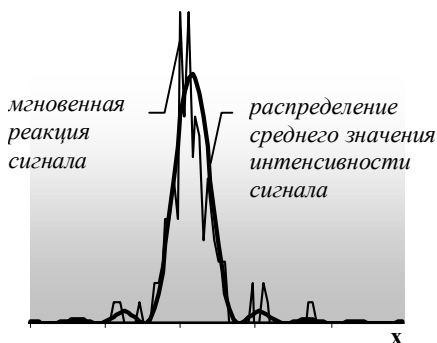


Рис. 2. Мгновенная реализация и распределение интенсивности оптического сигнала

При воздействии на вход АОАС двух радиосигналов на близких частотах в плоскости фотокатода будет формироваться две спектральные линии (А и В) подобные описанным выше (1):

$$I_A(x) = I_{A_0} \left[ \frac{\sin a(x - x_A)}{a(x - x_A)} \right]^2;$$

$$I_B(x) = I_{B_0} \left[ \frac{\sin a(x - x_B)}{a(x - x_B)} \right]^2.$$

Формируемые дифракционные картины спектральных линий двух радиосигналов складываются по интенсивности между собой в фокальной плоскости Фурье преобразователя [9]

$$I_{\Sigma}(x) = I_A(x) + I_B(x) = I_{A_0} \left[ \frac{\sin a(x - x_A)}{a(x - x_A)} \right]^2 + I_{B_0} \left[ \frac{\sin a(x - x_B)}{a(x - x_B)} \right]^2.$$

В этом случае, согласно критерия Релея, линии считаются разрешаемыми, если максимум одной из них совмещен с минимумом первого порядка другой (рис. 3).

Величина дифракционного разрешения определяются выражениями в угловой и линейной мере соответственно [9]:

$$\Theta_p = \Theta_p(x) = \frac{\lambda}{D_{об}}; \quad d_p = d_p(x) = \frac{\lambda F}{D_{об}},$$

где  $F, D_{об}$  – фокусное расстояние и диаметр объектива выполняющего Фурье-преобразование дифрагированного светового потока.

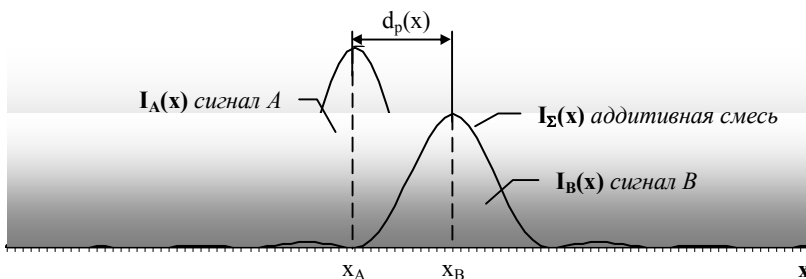


Рис. 3. Формирование двух близкорасположенных оптических сигналов

Таким образом, предельное дифракционное разрешение в АОАС прямо пропорционально длине волны регистрируемого светового потока и обратно пропорционально линейным размерам приемной апертуры. При регистрации широкополосных радиосигналов, вследствие возможной флуктуации их несущей частоты и амплитудной модуляции, возможны некоррелированные амплитудные искажения формируемых на фотокатоду оптических сигналов. В этом случае, амплитудные искажения проявляются в случайном изменении интенсивности регистрируемого фотоприемником АОАС сигнала.

Исходя из вышесказанного, в случае регистрации АОА двух широкополосных радиосигналов, при небольших рассогласованиях по частоте между ними, задача разрешения их спектральных линий может быть поставлена следующим образом. Пусть имеются две спектральные линии радиосигналов А и В, с интенсивностями  $I_A$  и  $I_B$  и некоррелированными флуктуациями амплитуды, причем возможен случай когда  $I_A > I_B$ , а линейное

расстояние между центрами дифракционных картин  $d(x) < d_p(x)$ . Результирующее изображение, регистрируемое фотоприемником, является результатом аддитивного взаимодействия дифракционных картин первого и второго сигналов. Требуется выделить шумоподобный сигнал слабого источника на фоне шумоподобного сигнала сильного источника.

Используя свойства симметрии и гладкости изображения оптических сигналов, при длительной экспозиции, а так же наличие некоррелированных флуктуаций интенсивности первой и второй линий для компенсации мощного сигнала и выделения более слабого воспользуемся идеей метода автокомпенсации шумового фона с использованием отдельного компенсационного канала [10]. Суть метода сводится к межканальному согласованному накоплению сигнала в системе, охваченной обратной корреляционной связью.

Функциональная схема устройства, реализующего данный метод, представлена на рис. 4.

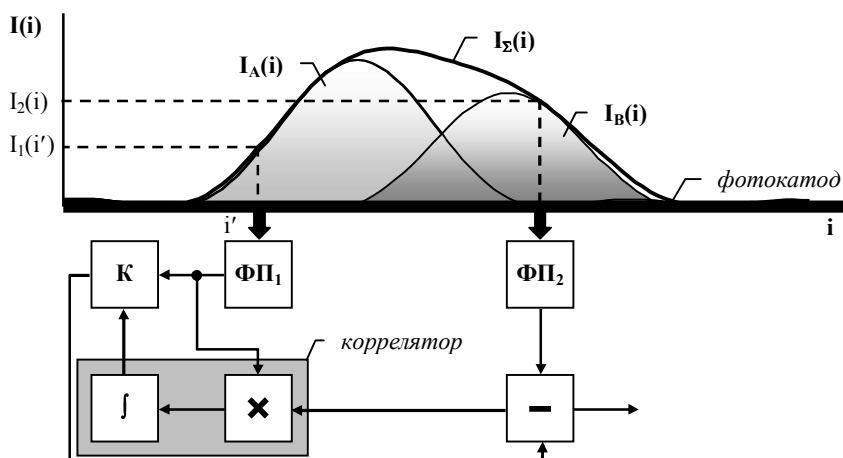


Рис. 4. Функциональная схема устройства автокомпенсации

Поясним принцип обработки сигналов в данном методе на примере обработки изображения, сформированного элементами одной строки фотокатода. По первому (компенсационному) каналу в схему обработки поступает сигнал, сформированный фотоприемником ФП<sub>1</sub> ( $i'$  – элемент разрешения строки), расположенным в точке фокальной плоскости, где существует спектральная линия сигнала А

$$I_1(i') = I_A(i').$$

По основному каналу поступает сигнал, сформированный фотоприемником ФП<sub>2</sub> под действием аддитивной смеси сигналов от первого и второго объектов. В ходе работы осуществляется последовательное считывание сигналов со всех элементов строки с номерами  $i > i'$  для обеспечения поступления в схему обработки сигнала

$$I_2(i) = I_{\Sigma}(i) = I_A(i) + I_B(i).$$

Основной и компенсационный каналы могут быть реализованы программно. Выходной сигнал схемы образуется в результате разностной обработки сигналов основного канала и компенсационного канала, усиленного с переменным коэффициентом усиления  $K$ :

$$I_p(i) = I_2(i) - KI_1(i').$$

При этом правило выбора величины коэффициента должно обеспечивать выполнение равенства (рис. 5)

$$KI_1(i') = I_A(i). \quad (4)$$

Выбор требуемого коэффициента усиления обеспечивается в соответствии с решающим правилом (4) за счет наличия в схеме обратной корреляционной связи, осуществляющей непосредственное управление параметрами усилителя с учетом статистики разностного сигнала, формируемого на выходе схемы. В процессе работы коррелятор осуществляет перемножение сигналов первого канала разностного сигнала с выхода схемы и усреднение полученных произведений по времени накопления. При этом сигнал с выхода коррелятора пропорционален приращению коэффициента усиления за время накопления.

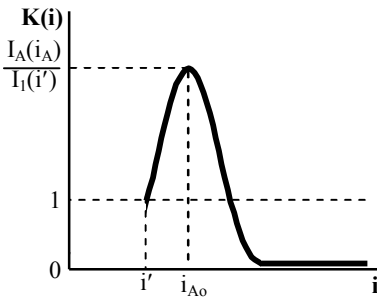


Рис. 5. Выбор коэффициента усиления

При этом сигнал с выхода коррелятора пропорционален приращению коэффициента усиления за время накопления.

В результате такой обработки сигналов основного и компенсационного каналов при отсутствии слабого сигнала ( $I_B(i) = 0$ ), будет обеспечиваться отсутствие выходного сигнала

$$I_p(i) = 0.$$

В точках, где слабый сигнал присутствует, выходной сигнал схемы будет соответствовать его значениям.

$$I_p(i) = I_B(i).$$

Восстановление сильного сигнала возможно после успешного окончания процедуры выделения слабого сигнала посредством попиксельной разностной обработки аддитивной смеси сигналов.

**Вывод.** Применение метода автокомпенсации шумового фона с отдельным компенсационным каналом в АОАС позволит реализовать сверхрелеевское разрешение близкорасположенных спектральных линий радиосигналов. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что разрешающая способность АОАС по одной координате может быть улучшена в 3 – 4 раза при отношении интенсивностей оптических сигналов  $I_A/I_B \approx 10$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков С.В. *Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов.* – Л.: Наука, 1978. – 144 с.
2. Слюсар В.И. *Сверхрелеевское разрешение узкополосных импульсов по времени задержки // Радиоэлектроника.* – 1999. – № 3. – С. 55 – 61.
3. Саваневич В.Е. *Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиоэлектроника и информатика.* – 1999. – № 1. – С. 4 – 8.
4. Гальярди Р., Карп Ш. *Оптическая связь.* – М.: Связь, 1978. – 424 с.
5. *Теория оптико-электронных систем: учебное пособие для студентов ВУЗов / Г.М. Мосягин, В.Б. Немтинов, Е.Н. Лебедев.* – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
6. Стрелков А.И., Стадник А.М., Коротков В.В. *Особенности работы некогерентного акустооптического спектроанализатора при конечном времени регистрации // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-тех. сб.* – 2001. – Вып. 122. – С. 162 – 168.
7. Стрелков А.И., Лытюга А.П., Стрелкова Т.А. *Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства // Радиотехника: Всеукр. Межвед. нуч.-техн. сб.* – 2003. – Вып. 132. – С. 7 – 13.
8. Москвитин С.В., Стрелков А.И. *Теоретические основы оптической локации.* – Х.: ВИРТА ПВО, 1992. – 369 с.
9. *Прикладная оптика / Под ред. Н.П. Заказнова.* – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
10. Алмазов В.Б. *Основы теории радиолокации.* – Х.: ВИРТА ПВО. – 1992. – 204 с.

Поступила 1.06.2005

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