

К. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, г. Донецк, НИИ комплексной автоматизации

Дата поступления в редакцию  
10.07 2000 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. Г. МИЛОСЛАВСКИЙ

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА

*Представлена гибридная акустоопто-электронная реализация анализатора спектра, сочетающего преимущества оптических систем, акустооптики и цифровой электрооптики.*

Высокие значения полосы анализируемых одновременно частот, разрешающей способности по частоте и времени прибытия сигнала позволяют акустооптическому анализатору спектра (АОАС) обрабатывать радиосигналы с базой  $B=W_c T_c \leq 10^4$ , где  $W_c$  — полоса частот,  $T_c$  — длительность радиосигнала (в одном канале). Благодаря таким уникальным возможностям АОАС находят применение в радиоастрономии, системах радиоэлектронной борьбы, радиолокации и др. [1–3]. Наибольший интерес представляют гибридные акустооптоэлектронные реализации АОАС, сочетающие преимущества оптических систем (высокая скорость обработки), акустооптики (большая база и реальный масштаб времени сигналов, вводимых в оптическую систему) и цифровой электроники (удобство хранения, преобразования, пересылки и представления информации).

### АЛГОРИТМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ АКУСТООПТИЧЕСКИМ АНАЛИЗАТОРОМ СПЕКТРА

Промежуточные результаты разработки АОАС и его элементов сообщались в [4–8].

Акустооптический анализатор спектра содержит три функциональных узла (см. рис. 1). Основой

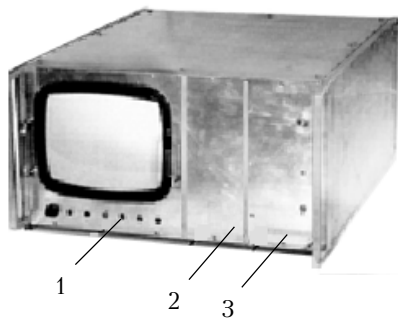


Рис. 1. Внешний вид акустооптического анализатора спектра (АОАС):

1 — блок индикации; 2 — блок сопряжения с ЭВМ; 3 — блок акустооптической обработки

АОАС является блок акустооптической обработки (БАО), структура которого, общий вид и конструктивное решение показаны на рис. 2.

Принцип действия блока акустооптической обработки с пространственным интегрированием основан на явлении акустооптического взаимодействия в фотоупругой среде оптических и упругих волн, а также на свойстве тонкой положительной линзы и сопряженных с ней слоев свободного пространства выполнять преобразования Фурье над пространственными оптическими распределениями.

В результате акустооптического взаимодействия в акустооптическом модуляторе (АОМ) оптического и акустического полей в выходной плоскости его формируется рассеянное световое поле:

$$E_d(t, z) = E_0 \exp(j\omega t) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(a_0) \exp[jm(\Omega t - Kz + 3\pi/2)], \quad (1)$$

где  $E_0$  и  $E_d$  — напряженность электрического поля падающей (поступающей на область акустооптического взаимодействия АОМ) и дифрагировавшей (рассеянной) световых волн;

$\omega$  — частота световой волны;

$J_m(a_0)$  — функция Бесселя первого рода  $m$ -порядка от аргумента  $a_0$ ;

$a_0$  — индекс фазовой модуляции;

$K=\Omega/v$  — волновое число акустической волны;

$\Omega$  и  $v$  — частота и скорость акустической волны в светозвукопроводе акустооптического модулятора.

В случае дифракции Рамана — Ната результатом акустооптического взаимодействия в плоскости с координатой  $z_1$  является световое распределение вида

$$E_d(t, z_1) = E_0 \exp(j\omega t) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(a_0) \exp[jm(\Omega t - Kz_1 + 3\pi/2)]. \quad (2)$$

В случае дифракции Брэгга тот же результат записывается в виде

$$E_d(t, z_1) = E_0 \sin\left(\frac{a_0}{2}\right) \exp\{j[\omega t - k(x \cos \Theta_B - z_1 \sin \Theta_B)]\} +$$

$$+ E_0 \sin\left(\frac{a_0}{2}\right) \exp\{j[(\omega + \Omega)t - k(x \cos \Theta_B - z_1 \sin \Theta_B) - Kz_1]\}, \quad (3)$$

где  $k$  — волновое число световой волны;

$\Theta_B$  — угол Брэгга.

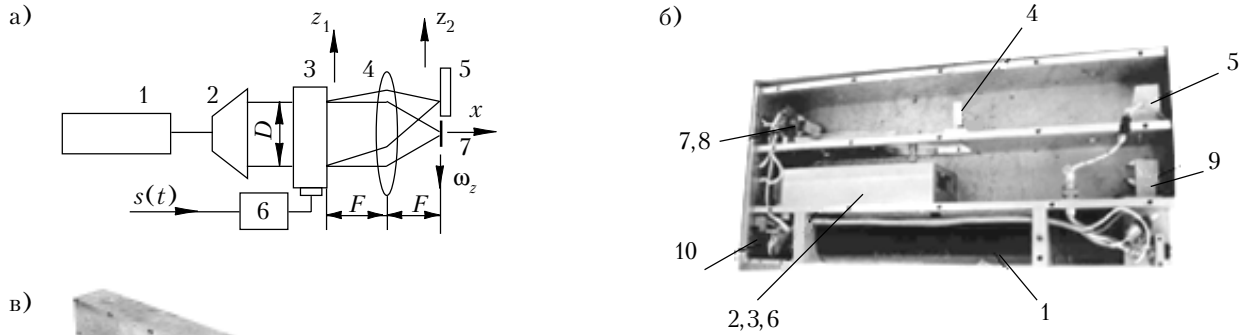


Рис. 2. Блок акустооптической обработки:

*a* – структура; *б* – конструктивное решение; *в* – общий вид  
 1 – лазер; 2 – формирователь светового распределения; 3 – акустооптический модулятор; 4 – фурье-линза; 5 – линейка фотоприемников; 6 – широкополосный усилитель; 7 – заглушка; 8–10 – зеркала

Распределение световых полей в передней и задней фокальных плоскостях линзы 4 (см. рис. 2) связано с преобразованием Фурье:

$$E_d(t, \omega_z) = B_1 \int_{-D/2}^{+D/2} E_d(t, z_1) \exp(-j\omega_z z_1) \cdot dz_1, \quad (4)$$

где  $\omega_z = -kz_2/F$  – пространственная частота;  
 $F$  – фокусное расстояние линзы;  
 $B_1$  – коэффициент пропорциональности;  
 $D$  – световая апертура АОМ.

С учетом (4) выражение (2) можно записать в виде

$$E_d(t, \omega_z) = B_1 E_0 D \exp(j\omega t) \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a_0) \times \exp\left(jm \frac{3\pi}{2}\right) \cdot \exp(jm\Omega t) \cdot \frac{\sin\left[(m\Omega + v\omega_z) \frac{D}{2v}\right]}{(m\Omega + v\omega_z) \frac{D}{2v}}. \quad (5)$$

Регистрация спектральных распределений, как правило, производится в области формирования дифракционных максимумов в выходной плоскости БАО (плоскость с координатой  $z_2$ ). Если выделить с помощью диафрагмы (на рис. 2 не показана) плюс первый дифракционный максимум, распределение в нем светового пучка будет отвечать условию

$$E_d'(t, \omega_z) = jB_1 E_0 D J_1(a_0) \frac{\sin\left[(\Omega + v\omega_z) \frac{D}{2v}\right]}{(\Omega + v\omega_z) \frac{D}{2v}} \cdot \exp[j(\Omega + \omega)t]. \quad (6)$$

Учитывая, что  $v\omega_z = -\omega$  – текущая частота спектра,  $D/v = T$  – длительность обрабатываемого сигнала, перепишем выражение (6) в виде

$$E_d'(t, \omega_z) = jB_1 E_0 J_1(a_0) \frac{\sin[(\omega - \Omega)(T/2)]}{(\omega - \Omega)(T/2)} \times \exp[-j(\omega - \Omega)t] \cdot \exp[j(\omega + \Omega)t]. \quad (7)$$

Акустооптические анализаторы спектра – линейные приборы, поэтому ограничение уровня входного сигнала задается для АОМ, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната, требованием вида [4]

$$J_1(a_0) = a_0/2 \quad (8)$$

и для АОМ, работающих в режиме дифракции Брэгга, –

$$\sin(a_0/2) = a_0/2. \quad (9)$$

При выполнении условий (8) и (9) сомножитель в (7) вида

$$g(\omega - \Omega) = \frac{\sin[(\omega - \Omega)0,5T]}{(\omega - \Omega)0,5T} \exp[-j(\omega - \Omega)t] \quad (10)$$

описывает спектральное распределение в выходной плоскости БАО и является его аппаратной функцией. В работе [4] показано, что ее вид не меняется, если АОМ анализатора спектра работает и в режиме дифракции Брэгга.

При подаче на вход усилителя 6 (см. рис. 2) радиосигнала  $s(t)$  поставим ему в соответствие аналитический сигнал  $z(t)$ , спектр которого зададим в виде

$$z(\omega) = \begin{cases} 2s(\omega) & \text{при } \omega > 0; \\ 0 & \text{при } \omega < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Тогда спектральное распределение в выходной плоскости БАО можно записать как

$$z(\omega, t) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega_0} z(\Omega) g(\omega - \Omega) d\Omega = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \exp(-j\Omega\tau) \times \int_{\omega_0 - \Delta\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega_0} \frac{\sin[0,5T(\omega - \Omega)]}{0,5T(\omega - \Omega)} \cdot \exp[-j(\omega - \Omega)t] \cdot d\Omega d\tau. \quad (12)$$

Таким образом, в выходной плоскости БАО, в области формирования +1-го дифракционного порядка, спектральное распределение определяется мгновенным спектром аналитического сигнала, соответствующего входному радиосигналу  $s(t)$ .

Важнейшей характеристикой акустооптического анализатора спектра является его разрешающая спо-

способность. Разрешения двух спектральных составляющих для БАО определяется согласно критерия Рэлея. При идеальном исполнении компонентов оптического тракта блока акустооптической обработки разрешение его определяется выражением вида

$$\Delta\Omega_p = 1/T = v/D. \quad (13)$$

В случае учета затухания акустической волны в апертуре АОМ спектральное распределение света в выходной плоскости БАО получается сверткой аппаратной функции вида (10) со спектром входного сигнала  $s(t)$ , взвешенной функцией вида [3]

$$A(\Omega) = 0,5[1 - \exp(-\Gamma v T \Omega^2)], \quad (14)$$

где  $\Gamma$  — частотно-независимый коэффициент затухания акустической волны в светозвукопроводе АОМ.

Приборы, позволяющие регистрировать мгновенный спектр радиосигналов на иных принципах функционирования, автору неизвестны, поэтому акустооптические анализаторы спектра считаются принципиально новыми приборами [1].

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

Необходимо отметить, что в силу отсутствия нормативных документов на разработку и постановку на производство акустооптических приборов аналогичного типа в настоящий момент в прикладной акустооптике отсутствуют соответствующие термины и определения. Поэтому перечень технических характеристик АОАС был составлен в соответствии с работой [3] и содержит: диапазон частот одновременного анализа — 47,5...72,5 МГц; частотное разрешение (по критерию Рэлея) двух одновременно принятых сигналов — 40 кГц; дискрет измерения частоты — 40 кГц; время опроса фоторегистрирующим устройством прибора полосы рабочих частот — 1 мс; динамический диапазон — 21 дБ; оперативная память индикатора прибора — 8 спектральных картин; емкость буферной памяти для сопряжения с ЭВМ — 64 спектральных картины; сопряжение АОАС с ЭВМ реализовано по интерфейсу «КОП»; питание прибора от сети постоянного тока 27 В; мощность, потребляемая от сети при номинальном напряжении, не более 70 Вт; габаритные размеры 240×470×580 мм; масса прибора — не более 40 кг.

#### Акустооптический модулятор

Структурные элементы АОМ и инженерная методика его расчета для систем оптоэлектронной корреляционной и спектральной обработки радиосигналов рассматривались автором в [3]. Основными элементами АОМ (рис. 3) являются [9] электроакустический преобразователь (ЭАП), светозвукопровод (СЗП), акустическая нагрузка (АН) и корпус модулятора. Электроакустический преобразователь реализован на основе пьезоэлектрической пластины (пьезопреобразователь) монокристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и предназначен для возбуждения упругой волны в СЗП, в объеме которого и происходит взаимодействие упругой волны и лазерного излучения (акустооптическое взаимодействие). Результатом



Рис. 3. Акустооптические модуляторы для АОАС

его является дифракция Рамана — Ната или Брэгга, а следствием — ввод радиосигнала в дифрагировавший лазерный пучок. В качестве светозвукопровода АОМ используется монокристалл КРС-5, а в качестве акустической нагрузки (предназначена для осуществления режима бегущей упругой волны в СЗП) — галлиевый сплав

ГОИМ-55. Корпус АОМ реализован на основе латуни. Наличие согласующей электрической цепи позволяет согласовать сопротивления выходного широкополосного усилителя и входного АОМ.

Основной технической характеристикой АОМ является электрооптическая частотная характеристика эффективности АОМ, определяемая выражением [9]

$$K_d(\Omega) = K_a \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega) = C Q_{KK} \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega) = \frac{\pi n \Lambda_B^2 M_2}{4H\lambda^3 \cos^2 \Theta_B} x \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda_B^2} x \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega), \quad (15)$$

где  $K_a = 100I_1 / (I_n P_a)$  — приведенная акустооптическая эффективность;

$I_1$  и  $I_n$  — интенсивность дифрагировавшего и падающего на область акустооптического взаимодействия лазерных пучков;

$P_a$  — мощность акустических колебаний волны, распространяющейся по СЗП;

$\prod_{i=1}^4 k_i$  — произведение четырех частотно-зависимых коэффициентов, описывающих процесс передачи энергии в системе «источник радиосигнала — согласующая цепь — пьезопреобразователь — светозвукопровод — акустическая нагрузка» [9];

$$C = \frac{\pi n \Lambda_B^2 M_2}{4H\lambda^3 \cos^2 \Theta_B} \text{ — параметр;}$$

$$Q_{KK} = \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda_B^2} \text{ — параметр Кляйна-Кука;}$$

$\Lambda_B = v/\Omega_B$  — длина волны Брэгга;

$\Omega_B = 2nv \sin \Theta_B / \lambda$  — частота Брэгга;

$n$  — показатель преломления среды СЗП;

$\lambda$  — длина волны лазерного излучения;

$M_2$  — акустооптическая добротность среды СЗП;

$L$  и  $H$  — длина и ширина области акустооптического взаимодействия в СЗП.

Приведенные ниже технические характеристики созданных акустооптических модуляторов получены при температуре окружающей среды 15...30°C, нормальных атмосферном давлении и влажности:

- длина волны лазерного излучения — 0,63 мкм;
- диапазон радиосигналов — 45...85 МГц;
- уровень неравномерности электрооптической частотной характеристики — не более 3 дБ;
- электрооптическая эффективность по уровню неравномерности — 12%/мВт;
- ширина полосы рабочих частот относительно центральной — не менее  $\pm 20$  МГц;
- длительность обрабатываемых сигналов  $\leq 25$  мкс;
- КСВН=2;
- входное сопротивление — 50 Ом;
- габаритные размеры — 70×30×22 мм.

Согласующая цепь, входящая в состав АОМ, — минимально-фазового типа.

### Широкополосный усилитель

При разработке широкополосных усилителей (ШУ) одной из основных остается проблема согласования его входного и выходного сопротивлений. Наиболее просто это решается применением диссипативных последовательных (при низкоомном входе и выходе) или параллельных (высокоомные входное и выходное сопротивления) цепей. Недостатками такого подхода являются уменьшение коэффициента передачи и, что очень важно для применений таких усилителей в составе АОАС, динамического диапазона усилителя — из-за увеличения шумов и уменьшения полезной мощности в нагрузке.

В данном ШУ используется способ согласования, основанный на применении комбинированных обратных связей (ОС) [8]. Во входных каскадах усилителя используется параллельная и последовательная отрицательная ОС, чем достигается стабилизация величины входного сопротивления и подгонка его путем вариации глубин двух ОС. Действие аналогичного характера на выходное сопротивление ШУ достигается одновременным использованием ОС по току и напряжению.

Проблема динамического диапазона (ДД) акустооптических анализаторов спектра радиосигналов общеизвестна. Основываясь на работах [4, 10], можно утверждать, что для практических применений АОАС в радиолокации он должен составлять величину не менее 20 дБ, в системах радиоэлектронной борьбы — не менее 50–70 дБ. Основными элементами анализатора, не позволяющими выполнить указанные требования, являются широкополосный усилитель и линейка фотоприемников [10]. Невозможность схемотехнических решений усилителей с линейной амплитудной характеристикой на существующей элементной базе без цепей автоматического регулирования усиления (АРУ) в указанных ДД обоснована [11]. Применение АРУ, как известно, ведет к расширению анализируемого спектра самим АОАС, и уровень его регулирования принимается в соответствии с допустимыми искажениями спектра, определяемыми техническим заданием на разработку.

Усилитель собран на плате из поликора размерами 35×30 мм с размещенными на ней транзисторами КТ 640А, резисторами МЛТ-125 и конденсаторами К10-17 (см. рис. 4).

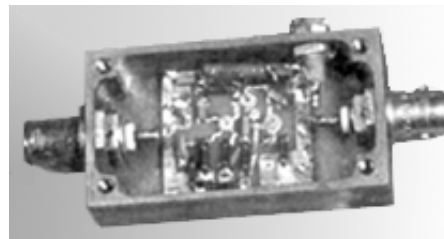


Рис. 4. Широкополосный усилитель АОАС

Технические характеристики усилителя:

- коэффициент усиления — не менее 22 дБ;
- рабочая полоса частот — 10...1200 МГц;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики — не более 3 дБ;
- коэффициент шума — не более 6 дБ;
- КСВН по входу — не более 1,5;
- КСВН по выходу на частотах до 500 МГц — не более 2, на частотах 500...1200 МГц — не более 2,5;
- относительные уровни гармонических составляющих при выходном напряжении 3 В (эффективное значение) — не более 40 дБ;
- ток потребления, не более 150 мА;
- напряжение источника питания — 12 В.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новые достижения в разработке оптических анализаторов спектра // Радиоэлектроника за рубежом. Обзор. — 1992. — Вып. 1. — С. 1–21.
2. Паркс. Акустооптический приемник — спектр-анализатор дециметрового диапазона / Зарубежная радиоэлектроника. — 1970. — № 12. — С. 14–39.
3. Данилов В. В. Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 2–3. — С. 52–57.
4. Данилов В. В., Роганов Л. М. Процессор радиосигналов на основе волоконно-оптической матрицы / Тез. докл. VI междунар. науч.-техн. конф. «ВОЛСПИ-95». — Запорожье, 1995. — С. 38–39.
5. Данилов В. В., Белик Т. В., Деркаченко Е. В., Роганов Л. М. Лазерное модуляционное устройство // ПТЭ. — 1992. — № 4 — С. 236–237.
6. Андреев А. А., Гусев О. Б., Данилов В. В. и др. Акустооптический анализатор спектра // Там же. — 1992. — № 6. — С. 205.
7. Данилов В. В., Литвиненко В. И., Ющенко И. Н., Роганов Л. М. Фоторегистрирующее устройство для акустооптического анализатора спектра // Там же. — 1993. — № 6. — С. 197.
8. Данилов В. В., Литвиненко В. И., Роганов Л. М., Чуркин А. В. Генераторный СВЧ-модуль / Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Информационно-управляющие и вычислительные комплексы на основе новых технологий». — С.-Петербург, 1992. — С. 156–157.
9. Данилов В. В. Инженерный расчет акустооптического модулятора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 2–3. — С. 16–21.
10. Данилов В. В., Роганов Л. М., Криворучко Л. Г. Динамический диапазон акустооптического модулятора / Тез. докл. II межотрасл. науч.-техн. конф. — Донецк, 1988. — С. 8–9.
11. Широкополосные радиопередающие устройства / Алексеев О. В., Головкин А. А., Полевой В. В., Соловьев А. А. — М.: Связь, 1978.