

# Многофункциональный оптоэлектронный процессор

Юрий ВАСИЛЬЕВ,  
д. т. н., профессор

**Оптоэлектронные методы обработки сигналов наиболее перспективны для многофункциональной аппаратуры XXI века. Среди них следует выделить акустооптические (АО) методы, которые находят широкое применение для обработки [1, 2], коммутации сигналов и доступа в тракт передачи волоконно-оптических систем передачи информации [3–5].**

Внедрение акустооптических методов обработки (АОМО) в аппаратуру осуществляется в виде оптоэлектронных/АО процессоров, которые имеют по сравнению с радиоэлектронными аналогами существенные преимущества: малые габариты при многофункциональности алгоритмов обработки; возможность обработки сигналов в реальном масштабе времени в широкой полосе частот (от сотен МГц до единиц ГГц); работа непосредственно на несущих частотах излучаемых сигналов до десятков ГГц; простота реализации математических алгоритмов обработки.

Информационные характеристики радиосигналов — это их временные и спектральные параметры. Поэтому решение комбинированных задач — одновременное определение в реальном масштабе времени временных и спектральных параметров сигналов — является актуальной проблемой.

В статье представлены результаты исследования АО-процессора в виде многофункционального комбинированного АО-устройства — АО демодулятора-спектроанализатора (АОДС), осуществляющего одновременно алгоритмы амплитудно-частотной демодуляции и спектрального (Фурье) анализа радиосигналов при одноканальном вводе в АО-процессор анализируемых АМ- и ЧМ-сигналов:

$$s_1(t) = A(t) \times \sin[2\pi f_1 t + \psi(t)], \quad (1)$$

где  $A(t)$  — изменение амплитуды,  $f_1$  — несущая частота,  $\psi(t)$  — изменение фазы,  $f(t) = f_1 + \psi'(t)$  — изменение частоты сигнала,  $\psi'(t) = d\psi(t)/dt$ .

АОДС определяет в реальном масштабе времени временные и спектральные параметры сигналов, поступающих на вход такого АО-процессора.

Элементом ввода электрических сигналов в устройство является двухкоординатная АО-ячейка (ДАОЯ), в которой анализируемый сигнал  $s_1(t)$  возбуждает акустическую волну, представляющую собой пространственно-временной аналог сигнала  $s_1(t)$  в виде движущейся дифракционной решетки, на которой дифрагирует коллимированный лазерный пучок, засвечивающий АО-ячейку.

Работа АОДС основана на теории двухкоординатного АО-взаимодействия [6]. Для демодуляции и спектрального анализа используется ДАОЯ, в которой акустические каналы  $i = 1, 2$  возбуждаются соответственно сигналом (1) и опорным сигналом  $s_2(t) = A_0 \times \sin(2\pi f_2 t + \varphi_0)$ . Акустические волны распространяются соответственно вдоль координат  $x$  и  $y$ . Из [6] следует, что при выборе длины  $l_0$  АО-взаимодействия из условия  $l_0 = \lambda/2\Delta n$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $\Delta n$  — изменение амплитуды показателя преломления в опорном канале  $i = 2$ , засвечивающий ДАОЯ падающий световой пучок интенсивностью  $I_0$  расщепляется на два пучка. При выполнении условия Брэгга  $\varphi_i = \arcsin(\lambda f_i/2v_i)$  амплитуда интенсивности  $I_{+1И}(\xi, \zeta, t_1)$  информационного пучка в +1-ом дифракционном порядке пропорциональна  $A^2(t)$ , а центры информационного  $I_{+1И}(\xi, \zeta, t_1)$  и опорного  $I_{+1О}(\xi, \zeta, t_1)$  световых пучков в фокальной плоскости  $(\xi, \zeta)$  линзы Фурье с фокусным расстоянием  $F$  смещены относительно друг друга в фокальной плоскости и имеют соответствующие координаты:

$$\xi(t_1) = \xi_0 + (\lambda F/2v_1)\psi'(t_1), \quad \zeta = \zeta_0, \quad \xi = 0, \quad (2)$$

где  $\xi_0 = (\lambda f_1 F)/2v_1$ ;  $\zeta_0 = (\lambda f_2 F)/2v_2$ ;  $\lambda$  — длина волны света;  $v_i$  — скорость ультразвука в  $i$ -ом акустическом канале ДАОЯ;  $\xi$  и  $\zeta$  — координаты, параллельные  $x$  и соответственно;  $T_1 = t_1 - (T_1/2)$ ,  $T_1 = L_1/2v_1$ ,  $L_1 \leq v\sqrt{2}/(|\psi''_{\max}(t_1)|)$  — апертура информационного канала  $i = 1$ , которая выбирается из условия распространения в пределах  $L_1$  квазигармонической акустической волны [7],  $\psi''_{\max}(t_1)$  — максимальная скорость изменения частоты сигнала  $s(t)$ .

Из (2) следует, что информационный световой пучок (световое пятно) перемещается вдоль координаты  $\xi$  по закону, идентичному закону изменения частоты  $\psi'(t)$  сигнала (1). Этот эффект используется для демодуляции с помощью специального демодуляторного блока (ДБ), включающего в себя в качестве основного элемента двухсекционный координатно-чувствительный фотоприемник (ДКЧФ), по светочувствительным площад-

кам которого перемещается световое пятно  $I_{+1И}(\xi, \zeta, t_1)$ . В этом случае с 1-й и 2-й фотоплощадок ДКЧФ поступают соответствующие электрические сигналы.

Для осуществления одновременно с демодуляцией алгоритма спектрального анализа апертуру  $L$  ДАОЯ выбирают из условия  $L = L_1 + L_2$ . В этом случае при длительности сигнала (1)  $\tau = L/2v_1$  часть апертуры  $L_2 = L - L_1$  отвечает за формирование вдоль свободной координатной оси  $0\xi$  ( $\zeta = 0$ ) линзы Фурье пространственно-временного спектра (ПВС) сигнала (1), который имеет вид:

$$I_{+1}(\xi, \zeta, t) = (h\Delta n/\lambda F)^2 \left| \tilde{H}(\omega_\xi - \omega_{\xi_0}, t)^2 \times \sin c^2(h\zeta/\lambda F), \quad (3)$$

$$\text{где } \tilde{H}(\omega_\xi - \omega_{\xi_0}, t) = \int_{L_1 - 0.5L}^{0.5L} A_{+1}(x, l_0, t) \tilde{s}_1(x, t) \exp(j\omega_\xi x) dx, \quad \sin cZ = \sin \pi Z / \pi Z,$$

$h$  — длина АО-взаимодействия вдоль координаты  $y$  распространения опорной акустической волны,  $\Delta n$  — изменение амплитуды  $n_0$  показателя преломления в информационном канале  $i = 1$  ДАОЯ,  $A_{+1}(x, l_0, t)$  — амплитуда дифрагированной световой волны [8], описывающая амплитудные искажения, вызванные рассогласованием угла Брэгга  $\varphi_1$  с частотами  $f \neq f_1$ ;  $\tilde{s}_1(x, t) = \tilde{B}(x, t) \exp(-j\omega_{\xi_0} x)$  — аналитический пространственно-временной сигнал;  $\tilde{B}(x, t) = B(x, t) \exp[j2\pi\psi(x, t)]$  — комплексная огибающая;  $\omega_\xi = k_0 \xi / F$  — текущая пространственная частота;  $\omega_{\xi_0} = k_0 \xi_0 / F$  — центральная пространственная частота,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

Параметры ДАОЯ выбираются таким образом [8], чтобы в пределах полосы частот  $A_{+1}(x, l_0, t) \approx \text{const}$ . В этом случае соотношение (3) представляет собой энергетический Фурье-спектр радиосигнала (1).

Комбинированный акустооптический метод (КАОМ) нашел практическое воплощение в АОДС, изображенном на рисунке, где 1 — лазерный световой пучок; 2 — ДАОЯ, состоящая из двух акустических каналов 3 и 4; 5 — генератор опорного сигнала (ГОС), подключенный к пьезопреобразователю 3; 6 —

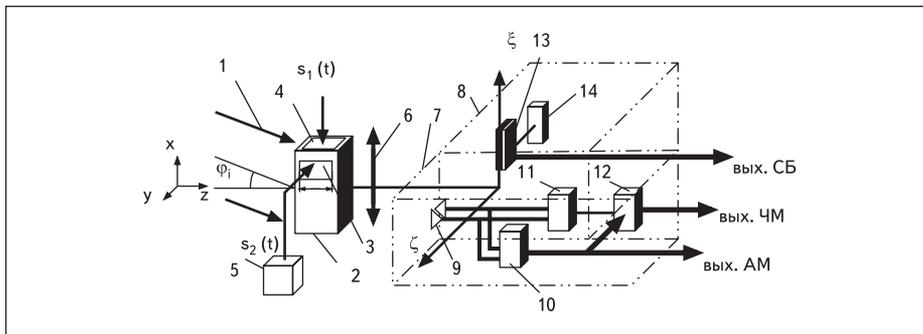


Рисунок. Схема комбинированного акустооптического метода

линза Фурье; 7 — оптоэлектронный демодуляторный блок (ДБ); 8 — оптоэлектронный спектральный блок (СБ).

ДБ 7 состоит из ДКЧФ 9, АМ- и ЧМ-каналов, которые включают в себя сумматор 10 и вычитающее устройство 11 с делителем 12, они могут быть выполнены в виде микросхем соответствующих операционных усилителей.

Выходной СБ 8 содержит линейку ПЗС 13 и электронный блок управления (БУ) 14. Каждая светочувствительная секция ДКЧФ имеет размеры  $\Delta$  и  $\Delta_1$  вдоль координат  $\xi$  и  $\zeta$ . Секции ДКЧФ разделены микрощелью размером  $\mu$ , наклоненной под углом  $\gamma$  к направлению перемещения  $0\xi$  информационного светового пучка  $I_{+1M}(\xi, \zeta, t_1)$ . Центр ДКЧФ располагается в области перемещения информационного пучка и имеет координаты  $\xi = \xi_0$  и  $\zeta = \zeta_0$ , соответствующие центральным частотам  $f_1$  и  $f_2$  анализируемого и опорного сигналов. Теоретический анализ показывает, что с выходов ЧМ- и АМ-каналов ДБ в полосе частот демодуляции:

$$(2\Delta f)_{\text{ЧМ}} = (1,6/T_1)[1+(L_1/htg\gamma)] \quad (4)$$

поступают электрические сигналы:

$$\begin{aligned} U_{\text{ЧМ}}(t_1) &= \Gamma(\gamma)\psi'(t_1)/M(b_1), \\ U_{\text{АМ}}(t_1) &= 2M(b_1)A^2(t_1), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Gamma(\gamma)$  — крутизна дискриминационной характеристики (АЧХ) ЧМ-канала,  $M(b_1) = (2/\pi b_1)\{Si(\pi b_1) - [\sin^2(0,5\pi b_1)/0,5\pi b_1]\}$ ;  $b_1 = \Delta_1/d_1$ ,  $d_1 = \lambda F/h$  — диаметр светового пятна, перемещающегося по ДКЧФ;  $Si(\epsilon)$  — интегральный синус.

Из (4) и (5) следует, что электрические сигналы ДБ изменяются во времени по закону изменения частоты  $\psi'(t)$  и квадрата амплитуды  $A^2(t)$  анализируемого сигнала (1).

Для регистрации спектров сигналов центр ПЗС-фотолинейки размещается в точке с координатами  $\zeta = 0$  и  $\xi = \xi_0$ . Она накапливает световой поток в течение времени накопления  $T_n$ , которое устанавливается с помощью БУ 14. На элементах ПЗС-линейки формируется соответствующий энергетическому спектру (3) электрический зарядовый рельеф  $q_n = q(\omega_{\xi_n})$ , где  $\omega_{\xi_n} = k_0\xi_n/F$  — пространственная частота, отвечающая коор-

динате  $\xi_n$  центра  $n$ -й ячейки ПЗС-линейки;  $n = -(N-1/2), \dots, 0, \dots, (N-1/2)$ .

Вывод зарядов  $q_n$  с фотолинейки осуществляется в последовательном режиме с помощью электрических импульсов считывания, которые подаются на регистр сдвига ПЗС-линейки с БУ 14. Напряжение сигнала  $U_n(t)$ , поступающего с  $n$ -й ячейки, описывается выражением:

$$U_n(t) = (DR_n/ST_n) \int_{-0,5\delta_1}^{0,5\delta_1} \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi) I_{+1}(\xi, \zeta, t) d\xi d\zeta dt, \quad (6)$$

где  $p(\xi) = 1$  при  $|\xi - \xi_n| \leq \delta/2$  и  $p(\xi) = 0$  при остальных  $\xi$ ;  $S = \delta \times \delta_1$  — площадь ячейки ПЗС-линейки;  $\delta$  и  $\delta_1$  — размеры ячейки вдоль  $\xi$  и  $\zeta$ ;  $D$  — постоянная, зависящая от материала ПЗС;  $R_n$  — сопротивление нагрузки  $n$ -й ячейки.

Фокусное расстояние  $F$  линзы 6 выбирается из соотношения  $F = v\Delta\xi/2\Delta f\lambda$ , где  $\Delta\xi$  — размер линейки ПЗС в направлении  $0\xi$ . В этом случае пространственные размеры ПЗС-линейки соответствуют полосе частот  $2\Delta f$  анализа, и при воздействии на вход устройства радиосигнала с полосой частот  $2\Delta f$  пространственно-временной спектр (3) засвечивает все элементы ПЗС-линейки.

Размер  $\delta$  элементарной ячейки много меньше размера ПЗС-линейки, поэтому (6) можно представить в виде:

$$U_n(t_1) = [KM(\tilde{b}_1)\delta_1/T_n] \int_{T_n} |H_1(\omega_{\xi} - \omega_{\xi_0}, t)|^2 dt,$$

где  $K = I_0(\pi l_1 h/\lambda^2 F)DR_n\Delta n_1$  — постоянный множитель;  $M(\tilde{b}_1)$  — множитель в формуле (5), который рассчитывается при  $b_1 = \tilde{b}_1$ ,  $\tilde{b}_1 = \delta_1/d_1$ ;

$$H_1(\omega_{\xi} - \omega_{\xi_0}, t) = \int_{L_1-0,5L}^{0,5L} \tilde{B}(x, t) \exp[j(\omega_{\xi} - \omega_{\xi_0})x] dx.$$

Электрические сигналы с линейки ПЗС выводятся с помощью электрических импульсов считывания, поступающих с БУ 14. Напряжение  $U_{\text{вых}}(t)$  выходного электрического сигнала, поступающего с линейки ПЗС, имеет вид последовательности:

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=(N-1/2)}^{N-1/2} U_n(t-nq),$$

где  $q$  — время задержки между электрическими импульсами, которое равно периоду следования импульсов считывания.

Выходной сигнал  $U_{\text{вых}}(t_1)$ , поступающий со спектрального блока 8, имеет вид последовательности электрических импульсов, амплитуды которых пропорциональны отсчетам пространственно-временного энергетического спектра  $|H_1(\omega_{\xi} - \omega_{\xi_0}, t)|^2$  в точках  $\xi = \xi_n$ , что соответствует значениям спектра в частотных точках  $f = f_n$ .

Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность АО-процессора с использованием гетеролазера на длине волны  $\lambda = 1,0$  мкм.

Параметры спектрального блока СБ 8 АО-процессора: полоса рабочих частот —  $2\Delta f = 0,95$  ГГц; разрешающая способность по частоте —  $\delta f = 1$  МГц; динамический диапазон — 35 дБ; длительность  $\tau$  обрабатываемых сигналов при работе спектрального канала в режиме приема импульсных сигналов составила не менее 2,5 мкс.

Канал демодуляции и ДБ 7 проверялись при подаче на вход АО-процессора непрерывных и импульсных сигналов с различными видами частотной модулирующей функции  $\psi'(t)$  (ЛЧМ-сигналы, АМ/ЧМ-сигналы, АМ-сигналы): центральная частота —  $f_0 = 1,5$  ГГц; разрешающая способность по частоте —  $\delta f_{\text{ЧМ}} = 20$  кГц.

### Литература

1. Васильев Ю. Г. Акустооптический метод демодуляции радиосигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 1998. Т. 3, № 2.
2. Васильев Ю. Г. Отношение сигнал-помеха в выходных каналах акустооптического демодулятора радиосигналов // Радиотехника. 2001. № 10.
3. Васильев Ю. Г. Двухкоординатные акустооптические переключатели // Радиотехника. 1997. № 10.
4. Васильев Ю. Г. Microoptical commutation Devices for Microsystem Technique // Тезисы докладов междунар. научно-техн. конференции «СЕН-СОР-2000». Санкт-Петербург, 2000.
5. Васильев Ю. Г. Спектральное оптическое устройство доступа в канал передачи ВОСПИ на основе градиентных микролинз // Компоненты и технологии. 2007. № 7.
6. Васильев Ю. Г. Особенности дифракции света на двух акустических волнах, одна из которых имеет сложный частотный состав // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 5.
7. Васильев Ю. Г. Акустооптическая демодуляция радиосигналов. Оптические методы обработки изображений и сигналов. Л.: ЛФТИ АН СССР, 1981.
8. Васильев Ю. Г. Особенности дифракции света на сложном ультразвуковом сигнале. Оптические методы обработки изображений и сигналов. Л.: ЛФТИ АН СССР, 1981.