

А. Н. РУДЯКОВА, к. т. н. А. Ю. ЛИПИНСКИЙ,
д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, Донецкий национальный университет
E-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Дата поступления в редакцию
10.04 2008 г.

Оппонент к. т. н. Т. И. ВОРОНЯК
(Физико-механический институт, г. Львов)

МАКЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ В АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Разработана функциональная модель взаимодействия акустической и оптической импульсных последовательностей сигналов в апертуре акустооптического модулятора. Экспериментальные данные подтверждают результаты моделирования и позволяют сделать вывод о корректности и адекватности модели.

В многочисленных публикациях, касающихся разработки и построения новых оптоэлектронных аппаратных средств (АС) обработки сигналов, рассмотрена концепция пространственно-временной дуальности [1]. Она выражается в том, что можно провести параллель между пространственной системой обработки сигналов (процессы параксиальной дифракции луча, проходящего в пространстве), которая увеличивает или уменьшает изображение, и временной системой (процессы дисперсии узкополосных импульсов в диэлектрической среде), которая растягивает или сжимает импульс. Эти процессы описываются подобными уравнениями [2—7]. Используя такой теоретический подход, можно отметить пространственно-временную дуальность, присущую акустооптическим устройствам обработки сигналов в целом.

Хорошо известны и находят широкое применение акустооптические АС, работающие и как пространственная система обработки изображений [8], и как временная система обработки сигналов, которая может растянуть или сжать импульс [9, 10]. В работе [11] рассмотрено нелинейное преобразование пространственно-временного сигнала (акустического волнового пакета) в апертуре акустооптического модулятора (АОМ) и показано, что акустооптическую ячейку можно отнести к гомоморфным системам с входной операцией сложения и выходной операцией умножения. Более того, акустооптические процессоры корреляционного типа могут быть построены как акустооптический коррелятор с пространственным или временным интегрированием (АОКПИ и АОКВИ, соответственно) [12]. В первом случае корреляционный интеграл формируется за счет интегрирования пространственно-временных распределений по пространственной координате, которая совпадает с направлением распространения звука в акустооптической среде. Во втором случае интегрирование осуще-

ствляется за счет накопления заряда фотоприемником, т. е. сигнал интегрируется в направлении распространения световой волны. Трудности, возникающие при решении задачи создания акустооптического устройства обработки сигналов, в котором выполняется пространственно-временное интегрирование, могут быть преодолены путем создания математической модели акустооптической ячейки в виде совокупности отдельных элементов (АОКПИ и АОКВИ) с соответствующими связями между ними [13, 14].

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение достоверности математической модели АОМ, работающего в режиме пространственно-временного интегрирования, предложенной авторами в [13]:

$$i_d(t) \sim \begin{cases} \frac{V}{4} u_{\text{вх}}^2(t) \int_0^t s_a^2(\tau) d\tau & \text{для } t < W/V, \\ \frac{V}{4} u_{\text{вх}}^2(t) \int_{t-W/V}^t s_a^2(\tau) d\tau & \text{для } t \geq W/V, \end{cases}$$

где $i_d(t)$ — выходной сигнал фотодетектора;
 $u_{\text{вх}}(t)$ — амплитуда падающего светового пучка;
 $s_a(\tau)$ — амплитуда акустического сигнала, заполняющего область акустооптического взаимодействия длины W ;
 V — скорость звука в среде.

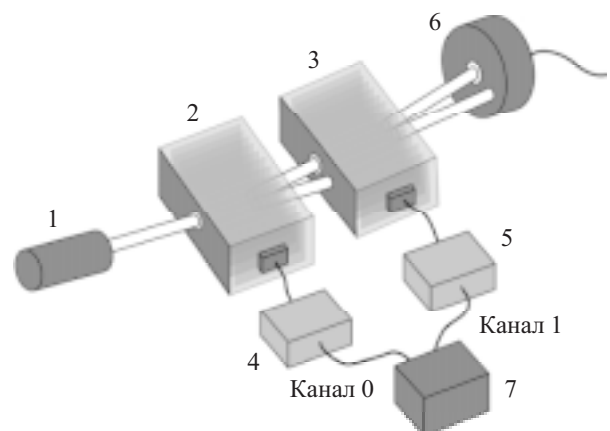


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 — источник света; 2, 3 — АОМ-1, -2; 4, 5 — драйверы АОМ; 6 — фотоприемное устройство; 7 — генератор импульсного сигнала для драйверов АОМ

Структурная схема экспериментальной установки для исследования пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде изображена на **рис. 1**.

Источник света, АОМ-1, АОМ-2 и фотоприемное устройство установлены на оптической скамье. Генератор электрического импульсного сигнала и дополнительное оборудование размещены на лабораторной стойке. В качестве источников питания драйверов АОМ и фотоприемного устройства используются аккумуляторы типа APC RBC17 с электронными стабилизаторами выходного напряжения.

В основу эксперимента положено следующее. Формирование выходного оптического сигнала АОМ зависит от процесса заполнения акустическим импульсом области акустооптического взаимодействия в случае дискретного распределения мощности звукового сигнала в акустооптической среде. Если же входной сигнал будет иметь вид оптической импульсной последовательности (форма импульсов прямоугольная), то при соответствующем фазовом сдвиге между оптическими и акустическими импульсами, поступающими на оптический и акустический вход АОМ, можно получить выходной оптический импульс с пологими фронтами и спадом, возникающими в результате пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде. Источник света вместе с АОМ-1 формируют оптическую импульсную последовательность, поступающую на оптический вход АОМ-2. В области акустооптического взаимодействия АОМ-2 выполняется пространственно-временное интегрирование, результат которого регистрируется фотоприемным устройством. Фазовый сдвиг акустического сигнала относительно оптического задается генератором импульсного электрического сигнала.

Рассмотрим формирователь оптической импульсной последовательности. В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер Melles Griot 05-LHR-911 с рабочей длиной волны 632,8 нм и мощностью излучения 5 мВт. Оптическая импульсная последовательность формируется модулятором Isomet 1205C-1, технические характеристики которого приведены в **таблице**.

Генератор электрического импульсного сигнала состоит из двух узлов: 4-канального цифрового синтезатора гармонического сигнала и формирователя импульсного сигнала (ТТЛ-уровня) на основе быстродействующих компараторов.

Технические характеристики АОМ Isomet 1205C-1

Диапазон длин волн, мкм	0,442—1,5
Среда взаимодействия	Молибдат свинца
Акустическая скорость, мм/мкс	3,63
Апертура, мм	1
Центральная частота радиосигнала, МГц	80
Полоса перестройки радиосигнала, МГц	30
Входной импеданс, Ом	50

В качестве генератора гармонического сигнала использован многоканальный цифровой синтезатор частот DDS AD9959 производства фирмы Analog Devices, содержащий 4 независимо программируемых канала. На **рис. 2** приведена структурная схема отладочного модуля AD9959 Evaluation Board.

Для каждого из четырех каналов DDS AD9959 обеспечена 14-разрядная настройка сдвига фаз, 32-разрядное разрешение по частоте и 10-разрядная регулировка амплитуды. Также предусмотрена возможность модуляции и развертки сигнала по частоте, при этом обеспечивается подавление сигналов соседних каналов не менее –60 дБ.

В синтезаторе AD9959 независимые каналы синхронизированы с помощью общего задающего генератора, что помогает избежать сложностей, связанных с синхронизацией нескольких синтезаторов частот. Программируемый контроль каналов позволяет корректировать фазовый сдвиг, который возникает во внешних аналоговых цепях, таких как цепи фильтрации, усиления, а также компенсировать задержки, вносимые проводниками печатной платы. Синтезатор отличается низким энергопотреблением — менее 165 мВт на канал.

Компаратор AD8564, включенный по схеме, изображенной на **рис. 3**, сравнивает амплитуды гармонических сигналов каналов 0 и 1 цифрового синтезатора AD9959 с сигналами от перестраиваемых источников опорного напряжения ИОН0 или ИОН1, соответственно.

В зависимости от значения выходного постоянного напряжения ИОН0 или ИОН1 изменяется фазовый угол сигналов для каналов 0 и 1, при котором происходит переключение компараторов. Таким образом можно формировать прямоугольные импульсы необходимой длительности и скважности. Фазовый сдвиг между сформированными импульсными последовательностями задается в одном из каналов цифрового синтезатора AD9959.

В состав фотоприемного устройства входят быстродействующий кремниевый $p-i-n$ -фотодиод Hamamatsu S5573 и малошумящий усилитель фототока на операционном усилителе AD8055.

Трансимпедансный усилитель фототока обеспечивает высокое входное сопротивление и малый уровень собственных шумов [15] и осуществляет преобразование малых токов (нА) в напряжения с такой амплитудой, которая может быть зарегистрирована лабораторным оборудованием (10—100 мВ). Отношение выходного напряжения к фототоку равно 1003 Ом.

Лазерный пучок диаметром, равным апертуре модулятора (1 мм), направляется на АОМ под углом Брэгга, электрический сигнал на выходе фотоприемного устройства, соответствующий интенсивности первого порядка дифракции АОМ, регистрировался осциллографом Tektronix TDS 220.

Верхняя осциллограмма на **рис. 4** соответствует сигналу, поступающему на вход драйвера АОМ с выхода генератора электрического импульсного сигнала. Как видно, частота следования импульсов — 1 МГц, амплитуда — 2,88 В. На нижней осциллограмме — сигнал с фотоприемника, соответствующий

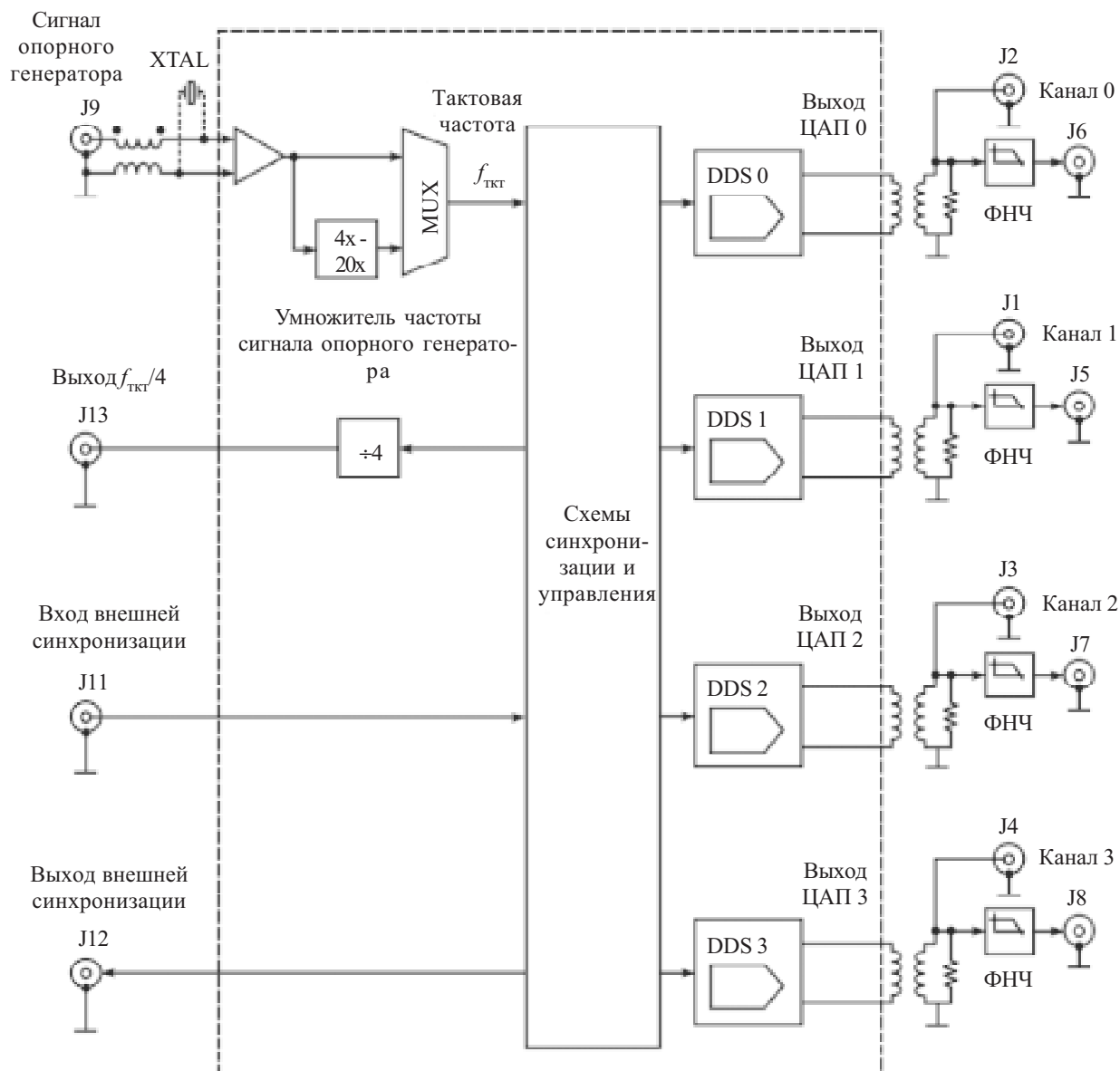


Рис. 2. Структурная схема отладочного модуля DDS AD9959

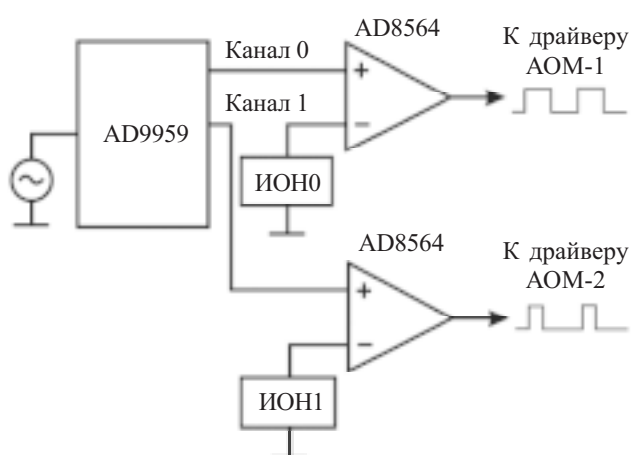


Рис. 3. Структурная схема формирования импульсов с переменной скважностью и длительностью

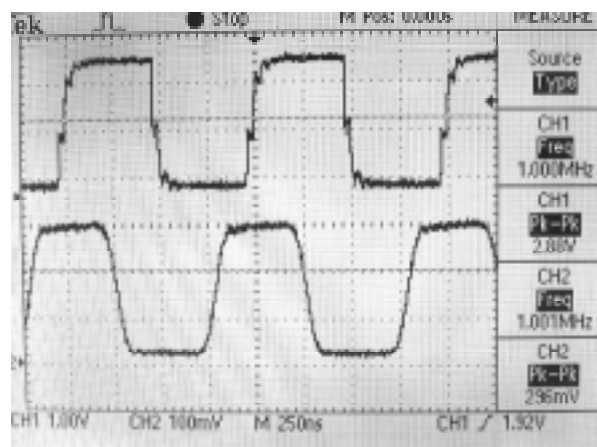


Рис. 4. Осциллограммы сигнала, поступающего на вход драйвера АОМ-1 (верхняя), и сигнала с выхода фотоприемника (нижняя)

первому порядку дифракции. Частота следования оптических импульсов — 1 МГц, амплитуда на выходе усилителя фототока — 296 мВ, что соответствует величине фототока около 295 мкА.

Моделирование процесса пространственно-временного интегрирования оптоэлектронными акустооптическими устройствами

Схема функциональной модели экспериментальной установки для исследования пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде с дискретным представлением акустического и светового сигналов, разработанная с использованием пакета Simulink 6.1, показана на рис. 5. Здесь модель АОМ аналогична модели, используемой в акустооптическом цифро-аналоговом преобразователе [13], ее апертура и скорость звуковой волны соответствуют техническим характеристикам используемого модулятора (см. таблицу).

Структура модели компаратора AD8564 (рис. 6) содержит инерционное звено, отражающее динамические характеристики реального компаратора.

На входы 1 и 2 подается постоянный сигнал, моделирующий сигнал от источника опорного напряжения, а также синусоидальный сигнал, моделирующий сигнал с выхода цифрового синтезатора частот AD9959. Результат моделирования сигнала на выходе компаратора 1, который затем подается на вход АОМ-1, представлен на рис. 7.



Рис. 6. Модель компаратора

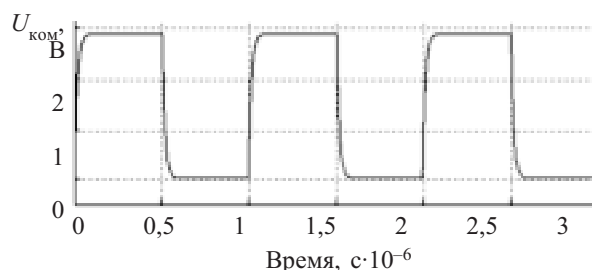


Рис. 7. Сигнал на выходе модели компаратора

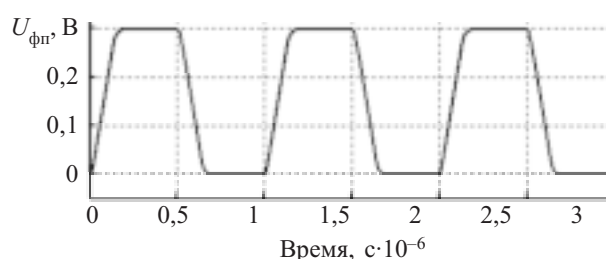


Рис. 8. Напряжение на выходе модели фотоприемника АОМ-1

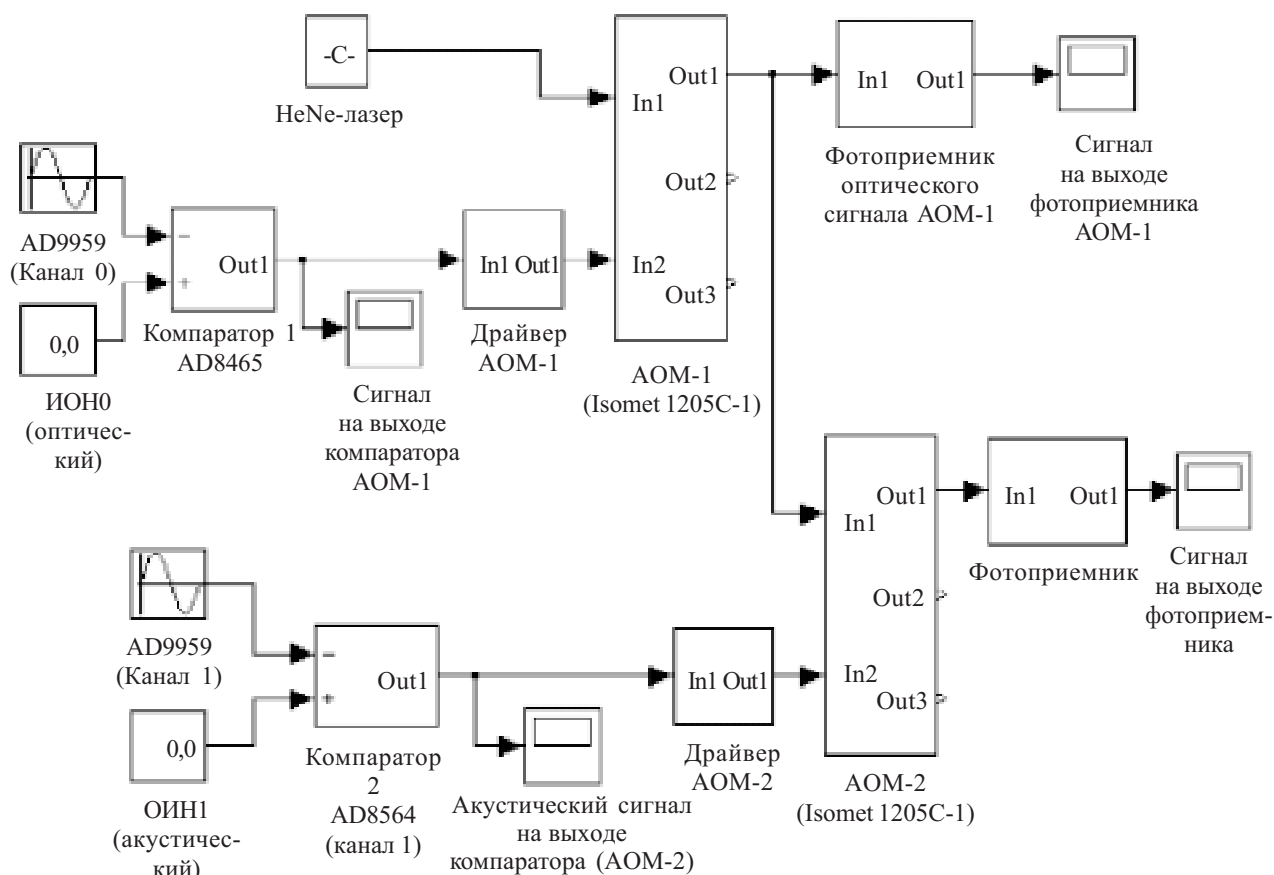


Рис. 5. Схема функциональной модели экспериментальной установки

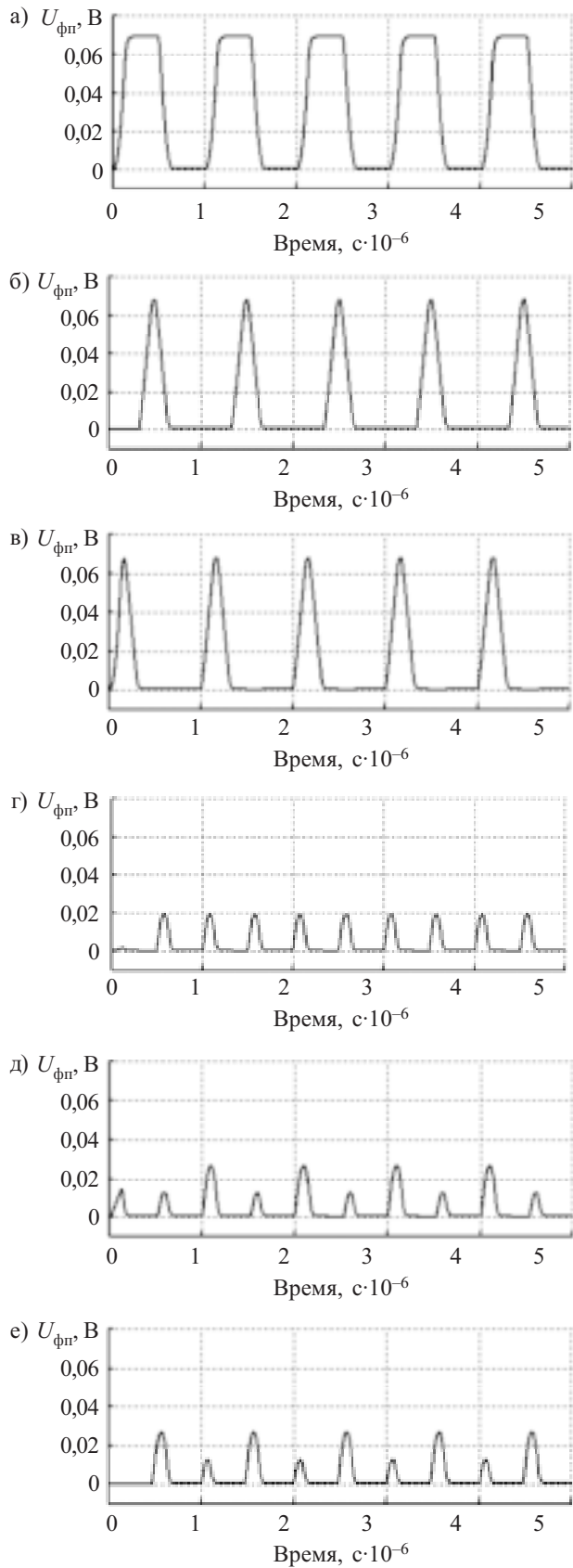


Рис. 9. Сигнал на выходе фотоприемника при различных фазовых сдвигах между каналами 0 и 1 генератора гармонических колебаний:
а — 0°; б — 240°; в — 120°; г — 180°; д — 170°; е — 190°

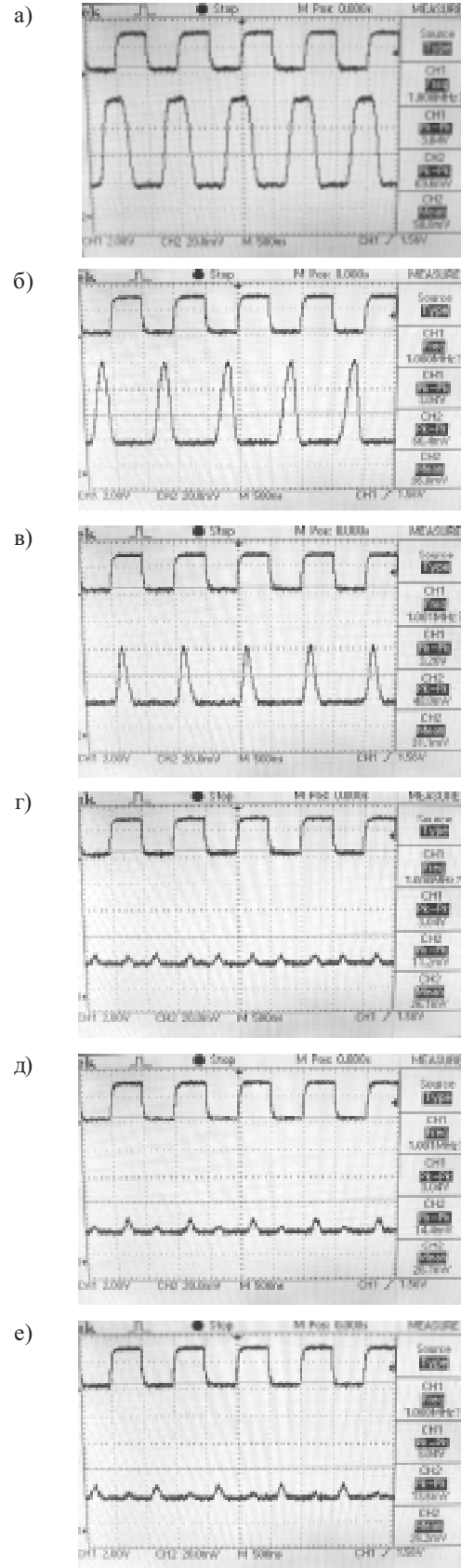


Рис. 10. Осциллограммы сигнала на выходе фотоприемника при различных фазовых сдвигах между каналами 0 и 1 генератора AD9959:
а — 0°; б — 240°; в — 120°; г — 180°; д — 170°; е — 190°

На выходе АОМ-1 получаем оптический сигнал первого дифракционного порядка (**рис. 8**), соответствующий оптическому сигналу Isomet 1205C-1.

Приведенные на **рис. 7** и **8** сигналы согласуются с осциллограммой, полученной в результате эксперимента (**рис. 4**).

С выхода АОМ-1 сигнал (**рис. 8**) подается на оптический вход АОМ-2. Результаты моделирования сигнала на выходе фотоприемного устройства для различных значений фазового сдвига между каналами 0 и 1 приведены на **рис. 9**.

В результате экспериментальных исследований получены осциллограммы электрического сигнала на выходе фотоприемника при различных фазовых сдвигах между каналами 0 и 1 генератора гармонических колебаний AD9959 (**рис. 10**).

Таким образом, в работе представлен разработанный авторами макет экспериментальной установки для исследования пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде.

Проведено экспериментальное исследование взаимодействия пространственно-временного сигнала (акустического импульса) с оптической импульсной последовательностью в апертуре акустооптического модулятора.

Результаты исследования (осциллограммы **рис. 10**) соответствуют временным зависимостям выходного сигнала фотоприемника, полученным в ходе функционального моделирования (**рис. 9**), что подтверждает верность выбранной математической модели пространственно-временного интегрирования в акустооптической среде.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Van Howe J., Xu C. Ultrafast optical signal processing based upon space-time dualities // Journal of Lightwave Technology.— 2006.— Vol. 24, N 7.— P. 2649—2662.
2. Mouradian L. K., Louradour F., Messenger V. et al. Spectrotemporal imaging of femtosecond events // IEEE J. Quantum Electron.— 2000.— Vol. 36, N 7.— P. 795—801.

3. Nakazawa M., Hirooka T. Distortion-free optical transmission using time-domain optical Fourier transformation and transform-limited optical pulses // J. Opt. Soc. Amer. B, Opt. Phys.— 2005.— Vol. 22, N 9.— P. 1842—1855.

4. Hakimi H., Hakimi F., Hall K. L., Rauschenbach K. A., A new wideband pulse-restoration technique for digital fiber-optic communication systems using temporal gratings // IEEE Photon. Technol. Lett.— 1999.— Vol. 11, N 8.— P. 1048—1050.

5. Azana J., Muriel M. A. Real-time optical spectrum analysis based on the time-space duality in chirped fiber gratings // IEEE J. Quantum Electron.— 2000.— Vol. 36, N 5.— P. 517—526.

6. Hall K. L., Moriarty D. T., Hakimi H. et al. An ultrafast variable optical delay technique // IEEE Photon. Technol. Lett.— 2000.— Vol. 12, N 2.— P. 208—210.

7. Akhmanov S. A., Vysloukh V. A., Chirkin A. S. Optics of femtosecond laser pulses // AIP.— New York.— 1992.— P. 14—17.

8. Turpin T. M. Spectrum analysis using optical processing // IEEE Proceedings.— 1981.— Vol. 69, N 1.— P. 79—92. (см. также ТИИЭР.— 1981.— Т. 69, № 1.— С. 93—108).

9. Rhodes W. T. Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation // Proc. IEEE.— 1981.— Vol. 69, N 1.— P. 65—79. (см. также ТИИЭР.— Т. 69, № 1.— С. 74—91).

10. Pat. 6091522 USA. Acousto-optic channelizer-based ultra-wideband signal processor / P. F. Snawerdt III, M. D. Koontz, R. K. Morse, N. C. Hollingsworth.— 2000.

11. Кулаков С. В., Москалец О. Д., Разживин Б. П. Акустический модулятор света как элемент оптической системы обработки сигналов // В кн.: Акустооптические методы обработки информации.— Л.: Наука, 1978.— С. 73—78.

12. Баруздин С. А., Егоров Ю. В., Калиникос Б. А. и др. Функциональные устройства обработки сигналов.— М.: Радио и связь, 1997.

13. Рудякова А. Н., Липинский А. Ю., Данилов В. В. Оптоэлектронный акустооптический цифро-аналоговый преобразователь // Реєстрація, зберігання і обробка даних.— 2007.— Т. 9, № 4.— С. 119—131.

14. Пат. 29963 України. Акустооптичний цифро-аналоговий перетворювач. Рудякова Г. М., Липинський О. Ю., Данилов В. В.— 2008.

15. P. C. D. Hobbs. Building Electro-Optical Systems: Making It All Work. Wiley, New York, 2000.— P. 625—651.

НОВЫЕ КНИГИ

Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда.— М.: Техносфера, 2008, 520 стр.

Книга, написанная всемирно признанными специалистами, представляет собой вводный курс в быстро развивающуюся и охватывающую новые сферы приложений область волоконно-оптических датчиков. В каждом из трех разделов — Основные компоненты, Технология и Приложения — приводятся отдельные примеры основных достижений в этой области. Вместе они предоставляют инженерам, научным работникам, студентам старших курсов и аспирантам возможность составить цельное впечатление о волоконно-оптических датчиках.

Книга может использоваться в качестве пособия при чтении учебных курсов, а также на промышленных семинарах по волоконно-оптическим датчикам.

