

УДК 004.31:004.22:534:621.382

А. Н. Рудякова, А. Ю. Липинский, В. В. Данилов
Донецкий Национальный университет. Кафедра радиофизики
ул. Университетская 24, 83055 Донецк, Украина
e-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Оптоэлектронный акустооптический цифро-аналоговый преобразователь

При решении проблем эффективной обработки и преобразования информации оптоэлектронными системами большое внимание уделяется реализации цифро-аналоговых устройств, характеристики которых могут существенно влиять на быстродействие таких систем в целом. В работе предложена функциональная модель оптоэлектронного акустооптического цифро-аналогового преобразователя, основанная на принципе пространственно-временного интегрирования, и выполнено моделирование работы такого устройства средствами пакета Simulink.

Ключевые слова: *оптоэлектронный акустооптический цифро-аналоговый преобразователь, пространственно-временное интегрирование, функциональное моделирование.*

Введение

Оптические информационные технологии, позволяющие реализовать устройства с большой вычислительной мощностью и объемом памяти, вызывают повышенный интерес у разработчиков современных вычислительных средств. Функционирование оптоэлектронных акустооптических устройств основано на учете в математической модели реальных свойств используемых фундаментальных физических явлений, которые могут порождать нечеткость как свойство математического описания. В этом смысле такие устройства могут быть использованы при построении систем нечеткой логики [1].

При решении проблем эффективной обработки и преобразования информации оптоэлектронными системами большое внимание уделяется реализации цифро-аналоговых устройств, характеристики которых могут существенно влиять на быстродействие таких систем в целом [2]. Цифровой синтез ультра-широкополосных аналоговых сигналов может существенно улучшить функциональность современных датчиков и коммуникационных систем. Ключевым элементом такого генератора формы сигнала является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

© А. Н. Рудякова, А. Ю. Липинский, В. В. Данилов

Электронные ЦАП пока ограничены частотой около 2 ГГц [3]. Оптические технологии могут быть способны увеличить эту частоту на порядок. В работе [4] представлено устройство 12,5 Гвыб/с цифро-аналогового конвертера с номинальным разрешением 6 бит и эффективным числом бит 3,8. Экспериментальные результаты [5] показывают, что четырехбитные цифровые отсчеты с интервалом в 1,65 пс могут быть успешно преобразованы в аналоговые сигналы в соответствии с входными цифровыми сигналами.

В работе рассмотрена функциональная модель оптоэлектронного акустооптического цифро-аналогового преобразователя (ОАЦАП), основанная на принципе пространственно-временного интегрирования [6].

Структурная схема и принцип действия ОАЦАП

В источниках [7, 8] предложена архитектура оптоэлектронного акустооптического процессора цифровой обработки сигналов, реализующего операцию дискретной свертки [9–11]. При этом используются методы аналоговой обработки информации и цифрового представления данных. Структурная схема процессора представлена на рис. 1.

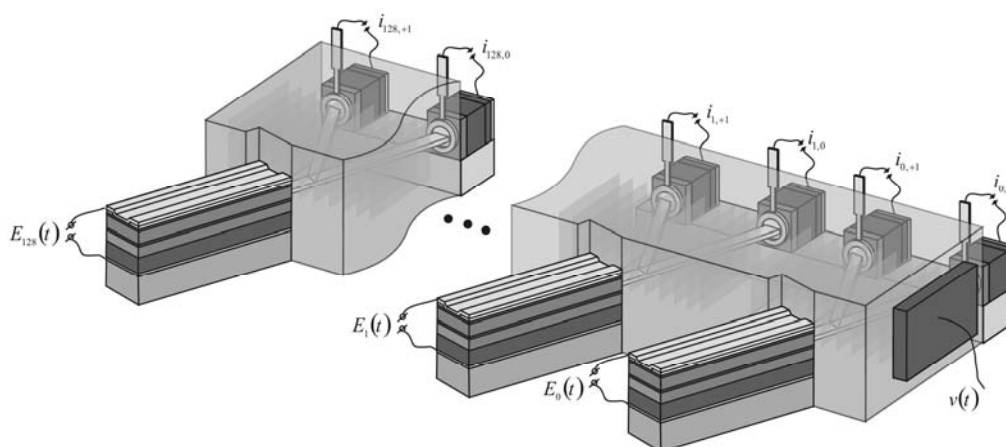


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного акустооптического цифрового сигнального процессора

Предложенный прототип размерами порядка $0,25 \times 9,6 \times 0,1 \text{ мм}^3$ содержит 128 брэгговских ячеек, и, в зависимости от исходной задачи, может быть оснащен дополнительными электронными устройствами кодирования/дискретизации и суммирования для использования как в качестве сигнального процессора, так и процессора-умножителя.

Такой акустооптический дискретный сигнальный процессор может быть положен в основу ОАЦАП. Однако, поскольку операция цифро-аналогового преобразования сводится к интегрированию дискретных отсчетов на протяжении интервала времени, значительно превышающего время дискретизации, применение только пространственного интегрирования затрудняет реализацию ОАЦАП. Поэтому предлагается использовать временное интегрирование для накопления дво-

ичных отсчетов, и, одновременно, пространственное интегрирование с целью фиксации акустических импульсов, соответствующих бинарному цифровому коду (рис. 2).

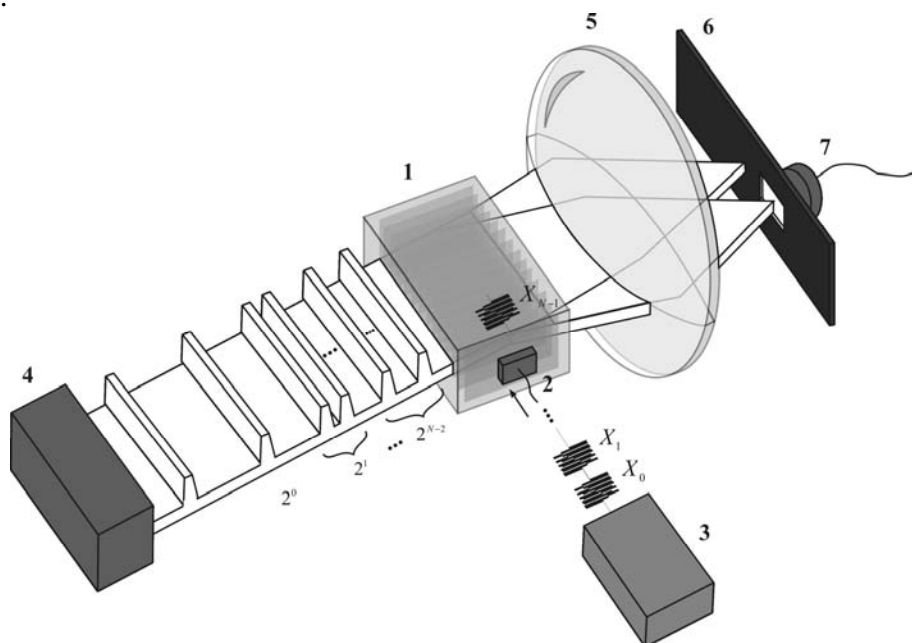


Рис. 2. Структурная схема акустооптического цифро-аналогового преобразователя с пространственно-временным интегрированием

Принцип действия устройства заключается в том, что для входного последовательного N -разрядного кода выполняется суммирование согласно выражению:

$$\begin{aligned}
 S &= 2^{N-2} \cdot X_{N-1} + 2^{N-3} \cdot \sum_{n=N-2}^{N-1} X_n + \dots + 2^1 \cdot \sum_{n=2}^{N-1} X_n + 2^0 \cdot \sum_{n=1}^{N-1} X_n + \sum_{n=0}^{N-1} X_n = \\
 &= \sum_{k=1}^{N-1} \left\{ 2^{N-k-1} \cdot \sum_{n=N-k}^{N-1} X_n \right\} + \sum_{n=0}^{N-1} X_n,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где X_n — значение «0» или «1» n -го разряда (n изменяется от 0 до $N-1$). Последовательный N -разрядный код в виде электрического сигнала высокого («1») или низкого («0») уровня, согласно значению X_n , поступает на вход устройства дискретизации 3, преобразующее его в последовательность радиоимпульсов, заполненных частотой, обеспечивающей брэгговский режим дифракции. Радиоимпульсы подаются на вход пьезоэлектрического преобразователя 2, возбуждающего соответствующую последовательность акустических импульсов в среде акустооптического взаимодействия 1. Параллельно с этим, с выхода устройства формирования модулированного оптического пучка 4 в акустооптическую среду вводится последовательность световых импульсов, количество которых отвечает количеству акустических импульсов, находящихся в акустооптической среде, согласно весу их разрядов (1). Световой пучок первого дифракционного порядка со-

бирается линзой 5 и сквозь отверстие внеосевой диафрагмы 6 подается на вход фотодетектора 7.

Функциональная модель ОАЦАП

В тех случаях, когда акустооптическая ячейка работает как пространственный модулятор, она обычно освещается пучком коллимированного света, распределение поля которого в результате дифракции на звуковых волнах меняется. В работе [12] показано, что акустооптическую ячейку можно описывать как линейную оптическую систему с передаточной функцией \mathbf{t} , зависящей от структуры акустического поля и геометрии акустооптического взаимодействия.

Для коэффициента пропускания акустооптической ячейки, работающей в режиме дифракции Брэгга с нулевым и первым дифракционными порядками (рис. 3), с точностью до постоянных множителей, можно записать [12]:

$$\mathbf{t}(x, t) = \left\{ 1 + j \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{s}}^*(x, t) \right\} \text{rect}(x/W), \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{s}}(x) = s_a(x, t) \exp[j(\Omega t - Kx)]$, $|s_a(x, t)| = s_a(x, t)$, $\arg\{s_a(x, t)\} = \alpha(x, t)$, $K = 2\pi/\Lambda$ — волновой вектор акустической волны; Λ — длина акустической волны; Ω — частота входного акустического сигнала, связанная с K соотношением $\Omega = KV$; V — скорость распространения упругих деформаций в среде; W — ширина ячейки; $\text{rect}(\cdot)$ — единичная прямоугольная функция (функция окна).

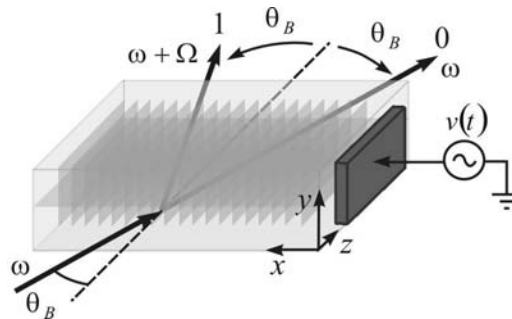


Рис. 3. Схема акустооптической ячейки, работающей в режиме дифракции Брэгга

Учитывая (2), и предполагая $\alpha(x, t) = 0$, амплитуда первого дифракционного порядка, используемого в качестве выходного сигнала системы $u_{\text{вых}}(x, t)$, будет равна половине произведения амплитуды падающего светового пучка $u_{\text{вх}}(t)$ и амплитуды акустического сигнала $s_a(x, t)$, заполняющего область акустооптического взаимодействия длиной W :

$$u_{\text{вых}}(x, t) = \frac{1}{2} u_{\text{вх}}(t) \cdot s_a(x, t). \quad (3)$$

При этом предполагается, что амплитуда входного светового пучка в направлении распространения акустического сигнала является функцией только времени и не зависит от пространственной координаты.

Как показано на рис. 2, выходной световой пучок собирается линзой, и фокусируется на фотодетекторе. При этом выходной сигнал фотодетектора, при условии достаточного запаса его быстродействия, с использованием (3), может быть представлен как:

$$i_d(t) \sim \int_0^W u_{\text{вых}}^2(\xi, t) d\xi = \frac{1}{4} u_{\text{вх}}^2(t) \int_0^W s_a^2(\xi, t) d\xi. \quad (4)$$

Поскольку координата x и время t для акустического сигнала s_a связаны между собой скоростью распространения акустической волны V , сигнал, заполняющий акустооптическую ячейку, является функцией переменной $(x - Vt)$. При этом, для реализации функциональной модели рассматриваемого устройства (рис. 2), удобно заменить статическую функцию окна, соответствующую пределам интегрирования от 0 до W в (4) динамической, «перемещающейся» в отрицательном направлении оси x со скоростью V , и соответствующей пределам интегрирования от $x - W$ до x . В этом случае, как показано на рис. 4, возможен переход к интегрированию по времени, с учетом масштабирующего коэффициента.

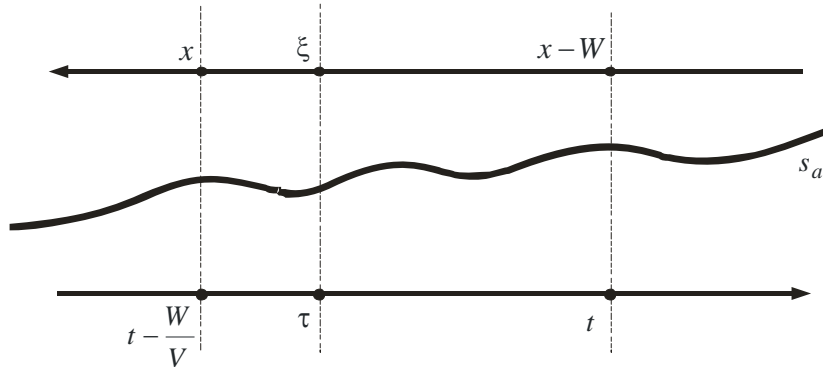


Рис. 4. Переход к интегрированию по времени в (4)

Как видно из рис. 4, переход от переменной интегрирования ξ к переменной интегрирования τ может быть осуществлен с использованием следующего соотношения:

$$\frac{\tau - \{t - W/V\}}{t - \{t - W/V\}} = \frac{\xi - x}{\{x - W\} - x},$$

откуда:

$$\tau - t + W/V = V(x - \xi),$$

$$d(x - \xi) = d\left(\frac{\tau - \{t - W/V\}}{V}\right),$$

$$-d\xi = \frac{1}{V}d\tau. \quad (5)$$

Знак минус в левой части выражения (5) обусловлен противоположным направлением осей x и t по отношению к акустическому сигналу s_a (рис. 4), и, поскольку в системе распространяется только один акустический сигнал, не изменяющий за время работы устройства направления распространения, в дальнейшем вместо (5) можно использовать:

$$d\xi = \frac{1}{V}d\tau. \quad (6)$$

С учетом (4) и (6) можно записать:

$$i_d(t) \sim \frac{1}{4V} u_{ex}^2(t) \int_{t-W/V}^t s_a^2(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо для случая, когда среда акустооптического взаимодействия уже заполнена акустическим сигналом. С учетом времени $\Delta t = W/V$, необходимого для первоначального заполнения акустооптической среды, выражение (7) можно записать следующим образом:

$$i_d(t) \sim \begin{cases} \frac{1}{4V} u_{ex}^2(t) \int_0^t s_a^2(\tau) d\tau, & \text{для } t < W/V, \\ \frac{1}{4V} u_{ex}^2(t) \int_{t-W/V}^t s_a^2(\tau) d\tau, & \text{для } t \geq W/V. \end{cases} \quad (8)$$

При использовании же фотодетектора со временем интегрирования, равным времени заполнения акустооптической среды акустическими импульсами, выражение для его фототока $i_{d,int}$, с учетом (3) и (6), можно записать как:

$$i_{d,int}(t) \sim \begin{cases} \frac{1}{4V} \int_{t-W/V}^t \left\{ u_{ex}^2(t) \int_0^t s_a^2(\tau) d\tau \right\} dt, & \text{для } t < W/V, \\ \frac{1}{4V} \int_{t-W/V}^t \left\{ u_{ex}^2(t) \int_{t-W/V}^t s_a^2(\tau) d\tau \right\} dt, & \text{для } t \geq W/V. \end{cases} \quad (9)$$

Функциональная модель оптоэлектронного акустооптического цифро-анало-

гового преобразователя, соответствующая (8) и (9), и изображенная на рис. 5, составлена с использованием блоков библиотеки пакета Simulink, реализующих операции умножения, задержки, интегрирования, возведения в степень и др. In1 — вход оптического сигнала $u_{ex}(t)$; In2 — вход акустического сигнала $s_a(t)$; Out1 — выход быстродействующего фотодетектора $i_d(t)$; Out2 — выход фотодетектора со временем интегрирования, равным времени заполнения акустооптической среды акустическими импульсами $i_{d,int}(t)$; Out3 — выход для отображения величины $P_a(t) = \frac{1}{V} \int_{t-W/V}^t s_a^2(\tau) d\tau$, пропорциональной мощности акустического сигнала, заполняющего акустооптическую ячейку.

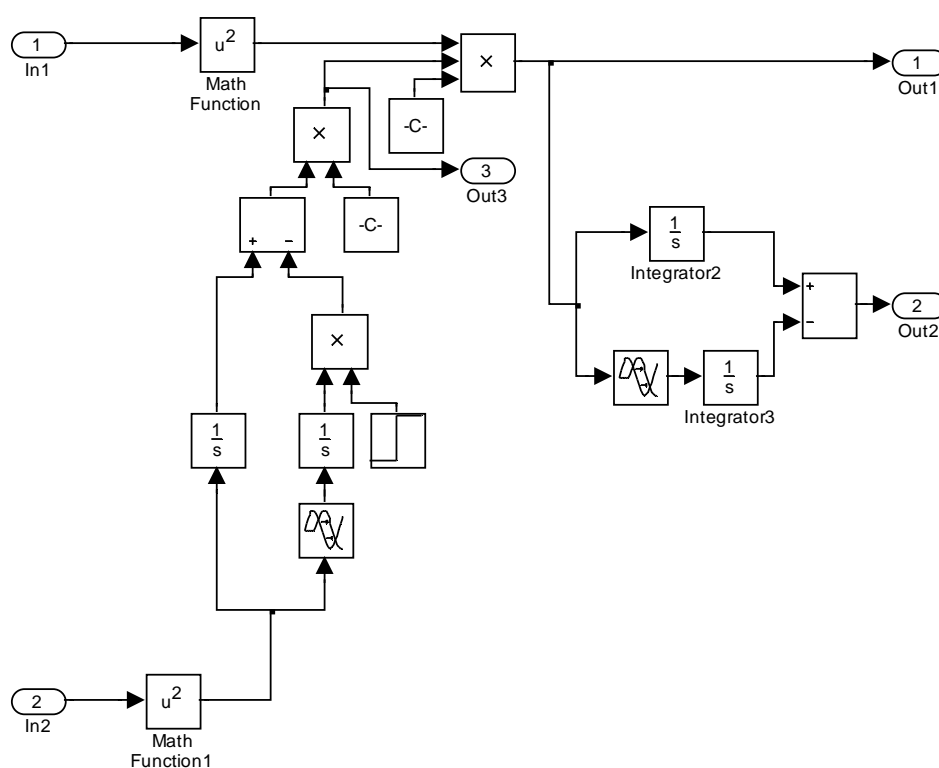


Рис. 5. Функциональная модель оптоэлектронного акустооптического цифро-аналогового преобразователя

Результаты моделирования

Функциональная модель ОАЦАП, описанная в предыдущем параграфе, была использована для моделирования 8-битного цифро-аналогового преобразователя, с длиной области акустооптического взаимодействия $W = 0,01$ м и скоростью звука в среде $V = 3000$ м/с, соответствующей стеклу TF7.

Модель изменения амплитуды входного акустического сигнала, соответст-

вующая кодам чисел 15, 55 и 255, представлена на рис. 6.

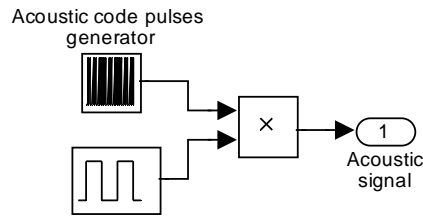


Рис. 6. Модель изменения амплитуды входного акустического сигнала

Осциллограмма изменения амплитуды входного акустического сигнала, полученная при моделировании с помощью пакета Simulink, изображена на рис. 7.

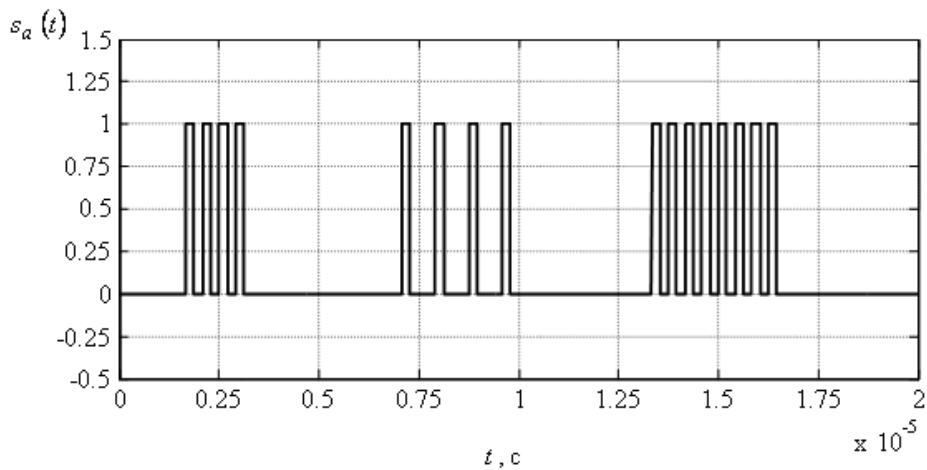


Рис. 7. Осциллограмма изменения амплитуды входного акустического сигнала, соответствующая числам 15, 55 и 255, или 00001111, 01010101 и 11111111 в двоичном виде, соответственно

Модель изменения амплитуды входного оптического сигнала, задающая весовые множители для 8-битного ОАЦАП, в соответствии с (1), а также осциллограмма этого сигнала, приведены на рис. 8 и 9 соответственно.

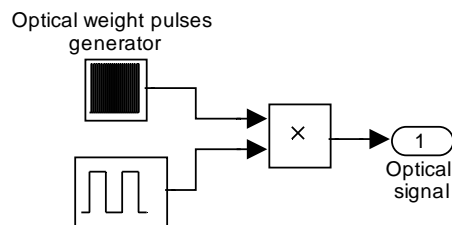


Рис. 8. Модель изменения амплитуды входного оптического сигнала

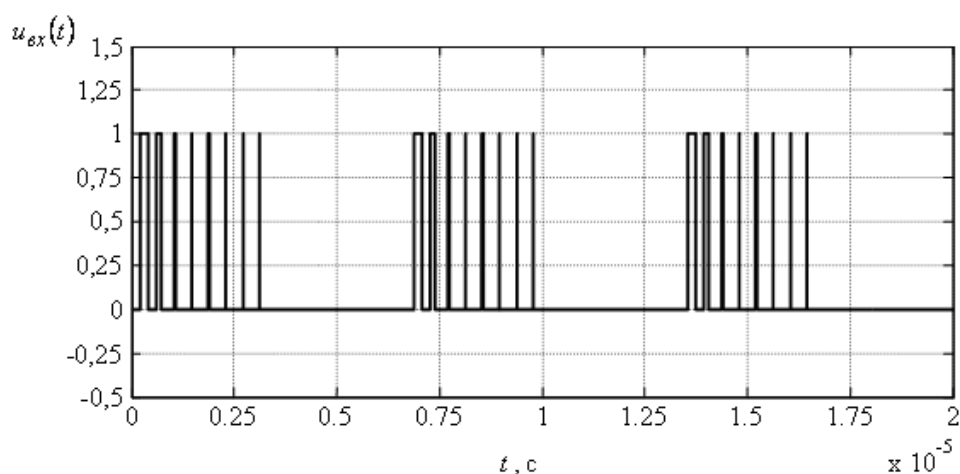


Рис. 9. Оциллограмма изменения амплитуды входного оптического сигнала, задающего весовые множители для 8-битного ОАЦАП

Оциллограмма сигнала, пропорционального мощности акустических импульсов, заполняющих акустооптическую ячейку, изображена на рис. 10.

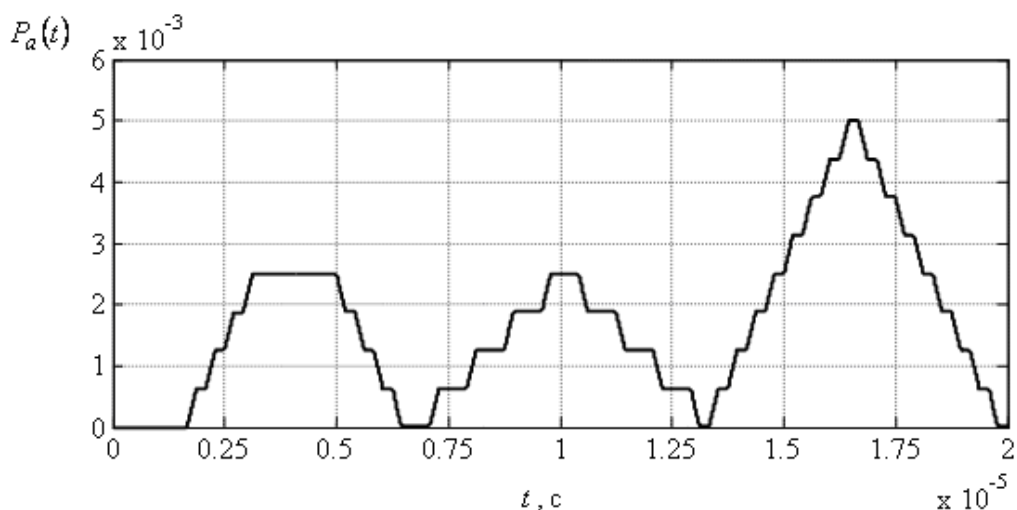


Рис. 10. Оциллограмма сигнала, пропорционального мощности акустических импульсов, заполняющих акустооптическую ячейку

Оциллограмма сигнала на выходе быстродействующего фотодетектора, соответствующая (8), изображена на рис. 11.

Оциллограмма сигнала на выходе фотодетектора со временем интегрирования, равным времени заполнения акустооптической среды акустическими импульсами, соответствующая (9), изображена на рис. 12.

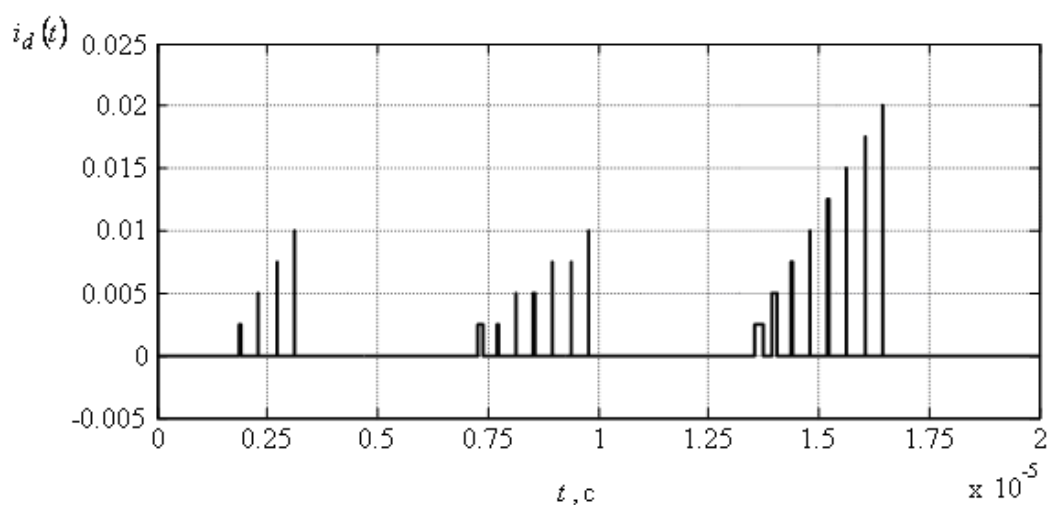


Рис. 11. Оциллограмма сигнала на выходе быстродействующего фотодетектора

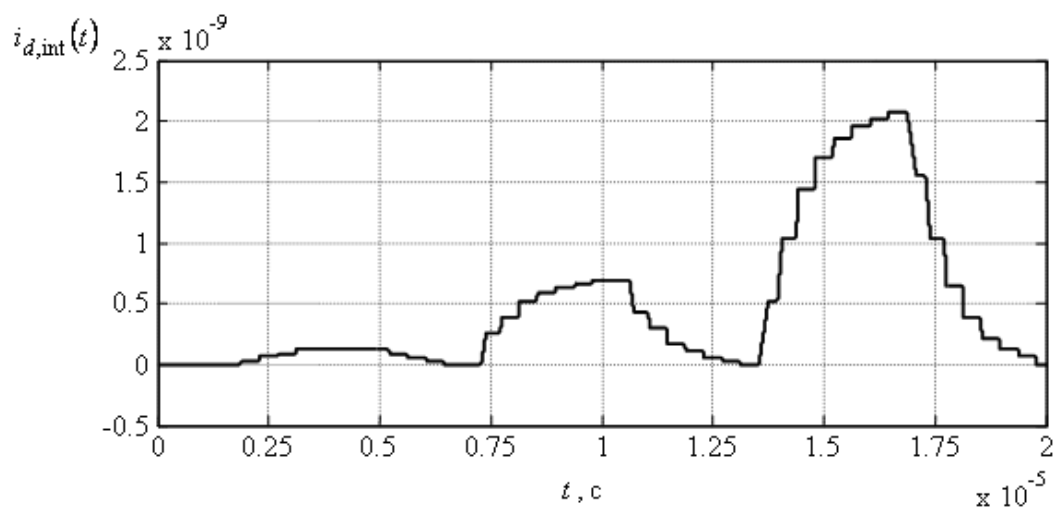


Рис. 12. Оциллограмма сигнала на выходе фотодетектора со временем интегрирования, равным времени заполнения акустооптической среды акустическими импульсами

Время цифро-аналогового преобразования зависит от свойств материала и длины области акустооптического взаимодействия, что связано с конечной скоростью распространения акустической волны. Для рассматриваемого 8-битного ОАЦАП время преобразования составляет $\sim 6,7$ мкс. Быстродействие устройства может быть существенно увеличено (на несколько порядков) за счет выбора материала с большей скоростью звука и уменьшения длины области акустооптического взаимодействия.

Границы применимости функциональной модели ОАЦАП

В работах [13, 14] рассмотрены вопросы использования акустооптической ячейки в качестве линейной оптической системы, при заполнении области взаимодействия акустическими импульсами.

С использованием физической модели, описанной в [13], с целью определения области линейности акустооптического взаимодействия, рассчитаны зависимости отношения интенсивности первого дифракционного порядка к интенсивности падающего света от амплитуды изменения показателя преломления Δn для диапазонов $\Delta n = (2...3) \cdot 10^{-5}$ и $\Delta n = (2,475...2,525) \cdot 10^{-5}$. Для каждого из диапазонов изменения Δn были проведены прямые по методу наименьших квадратов.

На рис. 13 представлен поточечный график результатов расчета для диапазона $\Delta n = (2...3) \cdot 10^{-5}$, и сплошной график, соответствующий аппроксимирующей прямой. Максимальное отклонение от линейного закона, нормированное на соответствующую интервалу разность отношений I_1 / I_0 , составило $\Delta_{err} = 0,00314$. В рассматриваемом интервале укладывается $N_{2\Delta_{err}} = 159,2$ удвоенных величин Δ_{err} , что соответствует $n = \log_2 N_{2\Delta_{err}} = 7,3$ двоичным разрядам.

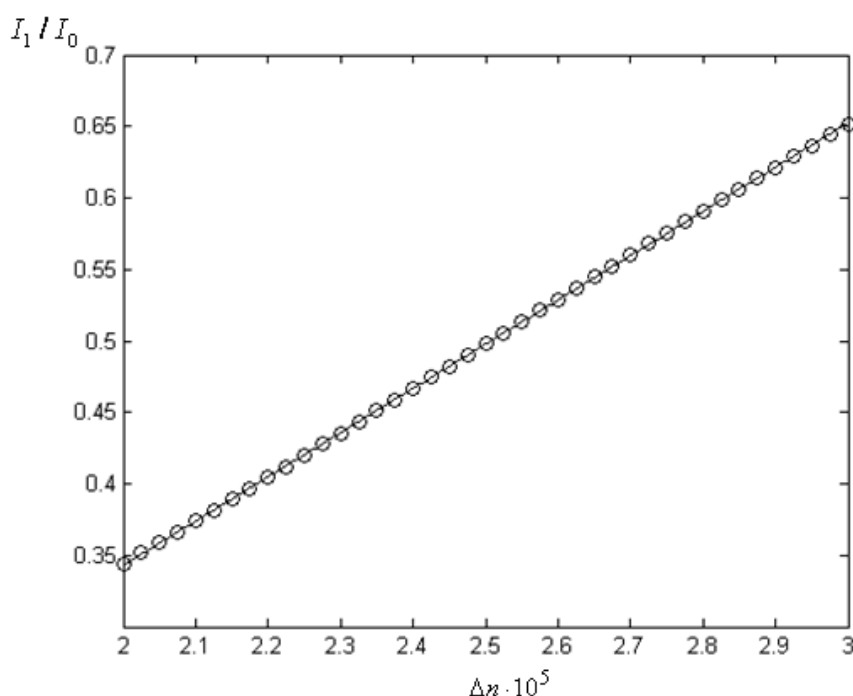


Рис. 13. Результаты расчета для диапазона $\Delta n = (2...3) \cdot 10^{-5}$ и соответствующая аппроксимирующая прямая

На рис. 14 представлены поточечный график результатов расчета и сплошной график, соответствующий аппроксимирующей прямой для диапазона $\Delta n = (2,475...2,525) \cdot 10^{-5}$.

Максимальное отклонение от линейного закона, нормированное на соответствующую этому интервалу разность отношений I_1 / I_0 , составило $\Delta_{err} = 1,08 \cdot 10^{-5}$. В интервале укладывается $N_{2\Delta_{err}} = 46013,8$ удвоенных величин Δ_{err} , что соответствует $n = \log_2 N_{2\Delta_{err}} = 15,5$ двоичным разрядам.

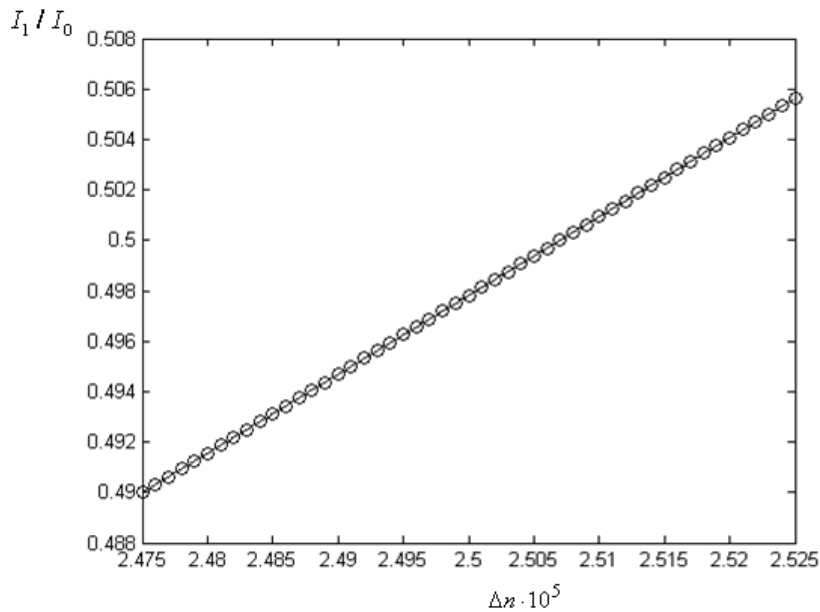


Рис. 14. Результаты расчета для диапазона $\Delta n = (2,475...2,525) \cdot 10^{-5}$ и соответствующая аппроксимирующая прямая

Меньший диапазон изменения $\Delta n = (2,475...2,525) \cdot 10^{-5}$ соответствует зависимости, более близкой к линейной, и может быть использован для повышения разрядности в случае дискретного представления сигнала.

Выводы

В работе предложена функциональная модель оптоэлектронного акустооптического цифро-аналогового преобразователя и выполнено моделирование работы такого устройства средствами пакета Simulink.

ОАЦАП имеет ряд преимуществ:

- точность преобразования устройства может достигать 128 и более разрядов без увеличения времени преобразования, поскольку ограничена только числом акустических импульсов, одновременно находящихся в акустооптической среде;

- по сравнению с известными фотонными цифро-аналоговыми преобразователями, предложенное устройство обладает высоким разрешением (числом бит на отсчет) при равном быстродействии, что делает перспективным его применение в устройствах распознавания импульсных последовательностей, используемых для сверхбыстрой маршрутизации данных;

- быстродействие устройств такого типа может на несколько порядков (в зависимости от разрядности) превышать быстродействие электронных аналогов за счет использования материалов с большой скоростью звука в качестве акустооптической среды;

- разрядность ОАЦАП можно изменять динамически, изменяя длительности акустических и оптических импульсов, что может представить интерес для разработчиков систем кодирования/распознавания радиосигналов, «свой–чужой» и т.д.

Уменьшение размеров области взаимодействия приводит к пропорциональному увеличению быстродействия ОАЦАП, поэтому перспективно интегральное исполнение таких устройств.

1. Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н. и др. Оптические процессоры: достижения и новые идеи // Проблемы когерентной и нелинейной оптики: Сборник статей; Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. — 268 с.
2. Данилов В.В. Основи створення пристроїв вводу, розуцільнення й адресації потоків інформації для оптичних обчислювальних засобів: Автореф. дис... д-ра. техн. наук / НТУУ «КПІ». — К., 2003.
3. Schaffer T.A., Warren H.P., Bustamante M.J., Kong K.W. A 2 GHz 12-bit Digital-to-Analog Converter for Direct Digital Synthesis Applications // Techn. Digest GaAs IC Symp., 1996. — P. 61–64.
4. Pat. 7061414 USA, B2. Optical Digital-to-Analog Converter. Chen Y.-K., Leven A., Tu K.-Y. — 2006.
5. Nishitani T., Konishi T., Furukawa H., and Itoh K. All-Optical Digital-to-Analog Conversion Using Pulse Pattern Recognition Based on Optical Correlation Processing // Optics Express. — 2005, Dec. — Vol. 13, N 25.
6. Рудякова А.Н., Липинский А.Ю., Данилов В.В. Моделирование оптоэлектронного акустооптического цифро-аналогового преобразователя с пространственно-временным интегрированием // Труды 8-й Междунар. научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса (Украина), 2007. — С. 247.
7. Липинський О.Ю. Оптоелектронні високоточні операційні пристрої дискретної обробки сигналів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / НТУУ «КПІ». — К., 2007.
8. Пат. UA № 15936 U. Акустооптический дискретный сигнальный процессор. Липинский А.Ю., Рудякова А.Н., Данилов В.В. — 2006.
9. Гуляев Ю.В., Проклов В.В., Соколовский С.В., Сотников В.Н. Акустооптические устройства обработки аналоговой и цифровой информации // Радиотехника и электроника. — 1987. — Вып. 1. — С. 169–181.
10. Psaltis D., Casasent D., Neft D., Carlotto M. Accurate Numerical Computation by Optical Convolution // Proc. SPIE. — 1980. — Vol. 232. — P. 151–156.
11. Logette P., Goutin P., Rouvaen J.M., Bridoux E. “Programmable hybrid acousto-optic processor for transversal and recursive filtering // Proc. Ultrasonics Symposium. 1991. — vol. 1. — P. 569–572.
12. Rhodes W. T. Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation // Proc. IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 65–79.
13. Липинский А.Ю., Рудякова А.Н., Данилов В.В. Физическая модель акустооптического процессора цифровой обработки сигналов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 1(61). — С. 9–12.
14. Липинский А.Ю., Рудякова А.Н., Данилов В.В. Моделирование слабого акустооптического взаимодействия методом конечных элементов во временной области // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2006. — Т. 8, № 2. — С. 25–37.

Поступила в редакцию 27.07.2007