

УДК 004.31:004.22:534:621.382

А. Ю. Липинский

Донецкий национальный университет. Кафедра радиофизики
ул. Университетская 24, 83055 Донецк, Украина
e-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Пространственно-временное представление сигналов в акустооптических устройствах дискретной обработки информации

Построена математическая модель вычислительной среды на основе пространственно-временного представления дискретных сигналов при акустооптическом взаимодействии. Проведено моделирование взаимодействия световых и акустических импульсов в акустооптической среде двумерным векторным методом конечных элементов во временной области, что показывает возможность построения вычислительной среды при малых размерах области взаимодействия, и может быть положено в основу создания интегральных устройств.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, пространственно-временное представление сигналов, дискретная обработка информации.

Введение

Трудности, возникающие при уменьшении размеров элементов электронных интегральных схем, увеличение рассеиваемой мощности, связанное с ростом частоты переключения полупроводниковых вентилях, физические пределы скорости распространения электрического сигнала определяют необходимость привлечения оптоэлектронных технологий для решения проблемы повышения быстродействия информационных систем [1–3].

Хорошо известны оптоэлектронные акустооптические устройства обработки сигналов, в основу функционирования которых положены принципы аналоговой обработки информации [4, 5]. Точность преобразования информации такими устройствами соответствует точности преобразования 8-, 10-разрядного цифрового устройства, так как минимальный уровень преобразуемых сигналов не может быть меньше уровня шумов. При переходе к дискретному представлению информации в канале преобразования, амплитуда сигналов может в десятки раз превосходить уровни шумов, что позволит увеличить точность преобразования и создать устройство с числом разрядов 64 и более [6]. При этом сохраняется высокая производительность (8 Топ/с [4]) при выполнении определенных типов функциональных

© А. Ю. Липинский

операций — сверточного перемножения массивов данных, скалярного умножения вектора на матрицу, матрицы на матрицу, тройного произведения матриц, решения систем линейных алгебраических уравнений, представляющих собой базовый набор операций для решения задач адаптивной фильтрации радиосигналов, формирования диаграммы направленности антенн с синтезированной апертурой, решения систем уравнений в частных производных и др.

В аналоговых акустооптических устройствах, используемых для обработки сигналов во временной области, обычно разделяют операцию накопления на пространственное интегрирование и временное. Это связано с трудностями одновременного математического описания обоих процессов, так как в реальных акустооптических устройствах приходится учитывать неинвариантность прихода акустических сигналов на момент начала преобразования [7]. В случае дискретного представления информации величина ошибки по времени может быть уменьшена от половины интервала времени, необходимого для преобразования, до половины длительности дискретизирующего импульса. Используя дискретное представление оптического и акустического сигналов, возможно построение оптоэлектронных акустооптических устройств, в которых может быть осуществлено «одновременное» и пространственное, и временное преобразование информации с высокой точностью [8].

Преобразование дискретных сигналов при акустооптическом взаимодействии

Пусть сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ принимают отличные от нуля значения только в интервале времени от 0 до W/V , и равны нулю вне этого промежутка.

Представим эти сигналы дискретными наборами отсчетов $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, соответствующими времени дискретизации $\tau \leq \pi/\omega_{\max}$, где ω_{\max} — ширина спектра, соответствующая более широкополосному сигналу.

При использовании дельта-функций в качестве дискретизирующих импульсов, получим:

$$\hat{s}_1(t) = \sum_k s_1(k\tau) \cdot \delta(t - k\tau), \quad (1)$$

$$\hat{s}_2(t) = \sum_n s_2(n\tau) \cdot \delta(t - n\tau). \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда сигналы $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$ «движутся» навстречу друг другу вдоль оси x , со скоростью V каждый (рис. 1), что может быть с некоторой точностью реализовано в системе из двух акустооптических ячеек с апертурами W , включенных в режиме конвольвера, при этом V — скорость звука в среде.

С учетом зависимости от координаты x , выражения (1) и (2) могут быть записаны как:

$$\hat{s}_1(t, x) = \sum_k s_1(k\tau) \cdot \delta(t - k\tau - x/V),$$

$$\hat{s}_2(t, x) = \sum_n s_2(n\tau) \cdot \delta(t - n\tau + x/V).$$

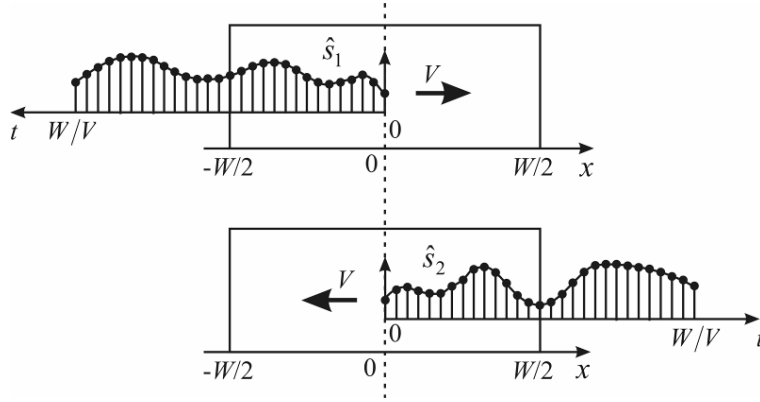


Рис. 1. Сигналы $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, «движущиеся» навстречу друг другу в акустооптической среде

Рассмотрим, как зависит от времени интеграл от произведения этих сигналов по переменной x/V на участке от $-W/(2V)$ до $W/(2V)$:

$$\begin{aligned} R(t) &= \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} \hat{s}_1(t, x) \cdot \hat{s}_2(t, x) d(x/V) = \\ &= \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} \left\{ \sum_k s_1(k\tau) \cdot \delta(t - k\tau - x/V) \right\} \cdot \left\{ \sum_n s_2(n\tau) \cdot \delta(t - n\tau + x/V) \right\} d(x/V) = \quad (3) \\ &= \sum_k \sum_n \left\{ s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} \delta(t - k\tau - x/V) \cdot \delta(t - n\tau + x/V) d(x/V) \right\}. \end{aligned}$$

Поскольку из-за выбранных длительностей и направлений распространения сигналов $\hat{s}_1(t, x)$ и $\hat{s}_2(t, x)$ их произведение обращается в нуль вне промежутка от $-W/(2V)$ до $W/(2V)$, в выражении (3) можно перейти от интеграла с конечными пределами к интегралу с пределами от $-\infty$ до $+\infty$. Воспользовавшись известными из теории обобщенных функций соотношениями [9, 10]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(a-x) \cdot \delta(x-b) dx = \delta(a-b),$$

$$\delta(ax) = 1/|a| \cdot \delta(x),$$

запишем выражение (3) в виде:

$$R(t) = \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \cdot \delta\{2t - \tau(k+n)\} = \sum_k \sum_n \frac{s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau)}{2} \cdot \delta\left\{t - \frac{\tau}{2}(k+n)\right\}. \quad (4)$$

Запишем выражение для свертки сигналов $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$:

$$\begin{aligned}
 C(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}_1(\eta) \cdot \hat{s}_2(t - \eta) d\eta = \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \sum_k s_1(k\tau) \cdot \delta(\eta - k\tau) \right\} \cdot \left\{ \sum_k s_2(n\tau) \cdot \delta(t - \eta - n\tau) \right\} d\eta = \\
 &= \sum_k \sum_n \left\{ s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\eta - k\tau) \cdot \delta(t - \eta - n\tau) d\eta \right\} = \\
 &= \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \cdot \delta\{t - \tau(k + n)\}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из сравнения выражений (4) и (5) видно, что функция $R(t)$, с точностью до множителя $1/2$, представляет собой свертку двух сигналов $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, однако ее отсчеты следуют с удвоенной частотой дискретизации.

При использовании прямоугольных функций $\Pi(t/\varepsilon)$ (рис. 2) в качестве дискретизирующих импульсов получим:

$$\hat{s}_1(t) = \sum_k s_1(k\tau) \cdot \{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2)\}, \tag{6}$$

$$\hat{s}_2(t) = \sum_n s_2(n\tau) \cdot \{\theta(t - n\tau + \varepsilon/2) - \theta(t - n\tau - \varepsilon/2)\}, \tag{7}$$

где $\theta(t)$ — функция Хевисайда [10]:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0, \\ 1 & \text{при } x > 0. \end{cases}$$

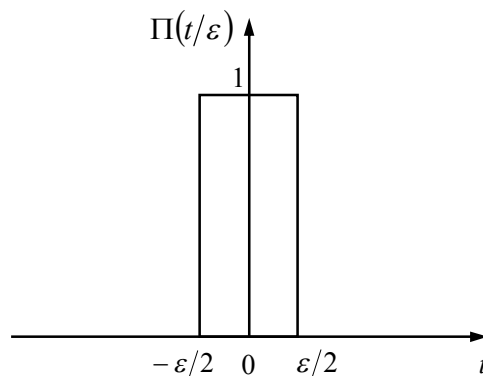


Рис. 2. Прямоугольная функция $\Pi(t/\varepsilon)$, используемая в качестве дискретизирующего импульса

Рассмотрим, как и выше, случай, когда сигналы $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$ «движутся» в акустооптической среде навстречу друг другу вдоль оси x , со скоростью V каждый. При этом $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$ представляют собой огибающие высокочастотных сигналов в системе из двух акустооптических ячеек, с апертурами W , включенных в режиме конвольвера, V — скорость звука в среде.

С учетом зависимости от координаты x , выражения (6) и (7) могут быть записаны как:

$$\begin{aligned}\hat{s}_1(t, x) &= \sum_k s_1(k\tau) \cdot \{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2 - x/V) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2 - x/V)\}, \\ \hat{s}_2(t, x) &= \sum_n s_2(n\tau) \cdot \{\theta(t - n\tau + \varepsilon/2 + x/V) - \theta(t - n\tau - \varepsilon/2 + x/V)\}.\end{aligned}$$

Рассмотрим, как зависит от времени интеграл от произведения этих сигналов по переменной x/V на участке от $-W/(2V)$ до $W/(2V)$:

$$\begin{aligned}R(t) &= \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} \hat{s}_1(t, x) \cdot \hat{s}_2(t, x) d(x/V) = \\ &= \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} \left[\sum_k s_1(k\tau) \cdot \{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2 - x/V) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2 - x/V)\} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_n s_2(n\tau) \cdot \{\theta(t - n\tau + \varepsilon/2 + x/V) - \theta(t - n\tau - \varepsilon/2 + x/V)\} \right] d(x/V) = \quad (8) \\ &= \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \int_{-W/(2V)}^{W/(2V)} [\{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2 - x/V) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2 - x/V)\} \times \\ &\quad \times \{\theta(t - n\tau + \varepsilon/2 + x/V) - \theta(t - n\tau - \varepsilon/2 + x/V)\}] d(x/V).\end{aligned}$$

Воспользовавшись известным из теории обобщенных функций соотношением [10]:

$$\theta(x - a) * \theta(x - b) = (x - a - b) \cdot \theta(x - a - b),$$

где знак $*$ обозначает свертку функций, представим выражение (8) в виде:

$$\begin{aligned}R(t) &= \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \cdot \left[\{2t - \tau(k + n) + \varepsilon\} \cdot \theta\left\{t - \frac{\tau}{2}(k + n) + \varepsilon/2\right\} - \right. \\ &\quad \left. - 2 \cdot \{2t - \tau(k + n)\} \cdot \theta\left\{t - \frac{\tau}{2}(k + n)\right\} + \{2t - \tau(k + n) - \varepsilon\} \cdot \theta\left\{t - \frac{\tau}{2}(k + n) - \varepsilon/2\right\} \right]. \quad (9)\end{aligned}$$

Запишем выражение для свертки сигналов $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, дискретизированных прямоугольными импульсами:

$$\begin{aligned}
 C(t) &= \hat{s}_1(t) * \hat{s}_2(t) = \left[\sum_k s_1(k\tau) \cdot \{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2)\} \right] \times \\
 &\quad \times \left[\sum_k s_2(n\tau) \cdot \{\theta(t - n\tau + \varepsilon/2) - \theta(t - n\tau - \varepsilon/2)\} \right] = \\
 &= \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \cdot \{\theta(t - k\tau + \varepsilon/2) * \theta(t - n\tau + \varepsilon/2) - \\
 &\quad - \theta(t - k\tau + \varepsilon/2) * \theta(t - n\tau - \varepsilon/2) - \theta(t - k\tau - \varepsilon/2) * \theta(t - n\tau + \varepsilon/2) + \\
 &\quad + \theta(t - k\tau - \varepsilon/2) * \theta(t - n\tau - \varepsilon/2)\} = \\
 &= \sum_k \sum_n s_1(k\tau) \cdot s_2(n\tau) \cdot \{[t - \tau(k+n) + \varepsilon] \cdot \theta\{t - \tau(k+n) + \varepsilon\} - \\
 &\quad - 2 \cdot [t - \tau(k+n)] \cdot \theta\{t - \tau(k+n)\} + [t - \tau(k+n) - \varepsilon] \cdot \theta\{t - \tau(k+n) - \varepsilon\}\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Из сравнения выражений (9) и (10) видно, что функция $R(t)$ представляет собой свертку двух сигналов $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, однако ее отсчеты «сжаты» по времени в два раза (рис. 3), и следуют с удвоенной частотой дискретизации.

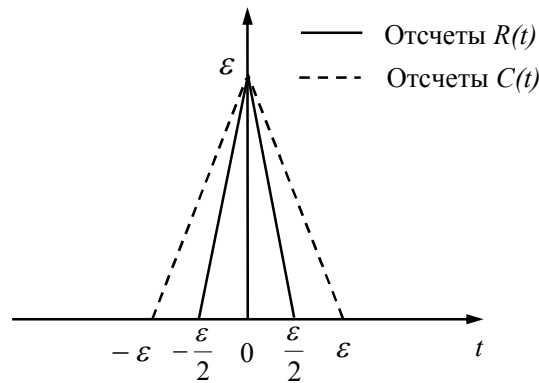


Рис. 3. Дискретизирующие импульсы, соответствующие функциям $R(t)$ и $C(t)$

Математическая модель акустооптической вычислительной среды на основе концепции пространственно-временного представления сигналов

Рассмотрим ситуацию, когда сигналы $\hat{s}_1(t)$ и $\hat{s}_2(t)$, определяемые выражениями (6) и (7) распространяются как показано на рис. 4: сигнал $\hat{s}_1(t)$ движется в акустооптической среде вдоль оси x со скоростью V , сигнал же $\hat{s}_2(t)$ движется почти перпендикулярно к нему (угол зависит от режима дифракции), вдоль оси z со скоростью света c . При этом, требование, чтобы исходные сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ принимали отличные от нуля значения только в интервале времени от 0 до W/V , и были равны нулю вне этого промежутка, не является обязательным.

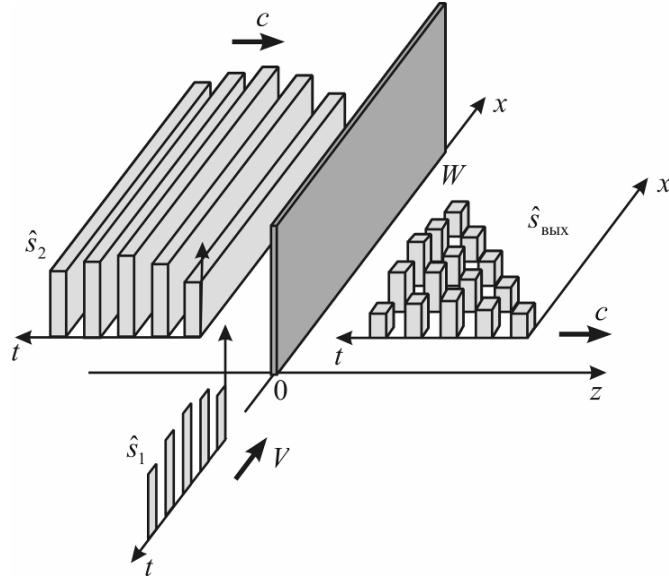


Рис. 4. Пространственно-временное представление дискретных сигналов

С учетом зависимости от координат x и z , а также в предположении, что времена дискретизации и длительности прямоугольных импульсов могут отличаться (τ_1 и τ_2 , ε_1 и ε_2 вместо τ и ε , соответственно), выражения (6) и (7) могут быть записаны следующим образом:

$$\hat{s}_1(t, x) = \sum_k s_1(k\tau_1) \cdot \{\theta(t - k\tau_1 + \varepsilon_1/2 - x/V) - \theta(t - k\tau_1 - \varepsilon_1/2 - x/V)\},$$

$$\hat{s}_2(t, z) = \sum_n s_2(n\tau_2) \cdot \{\theta(t - n\tau_2 + \varepsilon_2/2 - z/c) - \theta(t - n\tau_2 - \varepsilon_2/2 - z/c)\}.$$

Выходной сигнал $\hat{s}_{\text{ВЫХ}}(t, x, z)$, представляющий собой произведение сигналов $\hat{s}_1(t, x)$ и $\hat{s}_2(t, z)$, при этом равен:

$$\begin{aligned} \hat{s}_{\text{ВЫХ}}(t, x, z) = \sum_k \sum_n s_1(k\tau_1) \cdot s_2(n\tau_2) \cdot & \left[\theta\left(t - k\tau_1 + \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{x}{V}\right) \cdot \theta\left(t - n\tau_2 + \frac{\varepsilon_2}{2} - \frac{z}{c}\right) - \right. \\ & - \theta\left(t - k\tau_1 + \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{x}{V}\right) \cdot \theta\left(t - n\tau_2 - \frac{\varepsilon_2}{2} - \frac{z}{c}\right) - \\ & - \theta\left(t - k\tau_1 - \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{x}{V}\right) \cdot \theta\left(t - n\tau_2 + \frac{\varepsilon_2}{2} - \frac{z}{c}\right) + \\ & \left. + \theta\left(t - k\tau_1 - \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{x}{V}\right) \cdot \theta\left(t - n\tau_2 - \frac{\varepsilon_2}{2} - \frac{z}{c}\right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Выходной сигнал можно трактовать как сигнал, заданный для x и t , и движущийся вдоль оси z со скоростью c , как изображено на рис. 4.

В (11) каждый из членов суммы описывает элемент вычислительной среды, положение которого в пространстве и времени задается набором произведений функций Хевисайда (выражение в квадратных скобках), а амплитуда определяется произведением соответствующих дискретных отсчетов сигналов $s_1(k\tau_1)$ и $s_2(n\tau_2)$.

Моделирование пространственно-временного представления сигналов в акустооптической среде методом конечных элементов

Для построения векторной конечно-элементной модели взаимодействия акустического и светового импульсов предположим, что падающая световая волна является ТМ-волной, имеющей составляющую магнитного поля только вдоль оси z , и составляющие электрического поля только в плоскости $xу$. При этом акустооптическая среда предполагается однородной вдоль координаты z , что является допустимым при рассмотрении случая объемного взаимодействия [11].

Используя соотношения

$$\mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t},$$

где \mathbf{A} — векторный потенциал, \mathbf{E} , \mathbf{H} , — напряженности электрического и магнитного полей соответственно, можно записать следующее уравнение для \mathbf{A} :

$$\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0,$$

которое для $\mu_r = 1$ и $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ может быть представлено в виде:

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(n^2 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = 0. \quad (12)$$

Ограничимся областью анализа размером $14 \times 19,5$ мкм². При выбранных значениях показателя преломления $n = 2,3852$ и длины световой волны в свободном пространстве $\lambda_0 = 0,6328$ мкм, размер рассматриваемой области приблизительно равен $50\lambda \times 70\lambda$, где λ — длина волны света в материале среды. Для реализации брэгговской дифракции при таком размере области анализа, длина акустической волны Λ выбрана равной 0,5 мкм.

Для решения задачи о взаимодействии оптического и акустического импульсов в акустооптической среде, необходимо дополнить уравнение (12) для векторного потенциала условиями на границе области анализа. В качестве граничного условия выбрано следующее соотношение [12, 13], обеспечивающее «прозрачность» границы для плоских волн:

$$\mu_0 \mathbf{n} \times \mathbf{H} = -\sqrt{\mu_0 \varepsilon} \left(\mathbf{n} \times \left(\mathbf{n} \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (\mathbf{k} - \mathbf{n}) \times \mathbf{E}_0 \right) \right).$$

При этом \mathbf{n} — единичный вектор внешней нормали к границе, а \mathbf{E}_0 и \mathbf{k} — вектор напряженности электрического поля падающей световой волны, и единичный вектор, указывающий на направление ее распространения, соответственно.

Входящий световой пучок, изображенный на рис. 5, задается компонентой напряженности электрического поля $E_{0,y}$, имеет гауссово распределение амплитуды в сечении, представляет собой последовательность из трех импульсов с огибающими гауссовой формы во времени, и определяется следующими выражениями:

$$E_{0,y} = E_0 \cdot E_n \cdot E_{имп},$$

$$E_n = \exp\left\{-\frac{y^2}{w_0^2}\right\},$$

$$E_{имп} = \left[\exp\left\{-\frac{(t-t_0)^2}{\Delta t^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(t-3t_0)^2}{\Delta t^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(t-5t_0)^2}{\Delta t^2}\right\} \right] \cdot \cos(\omega_0 t),$$

где E_0 — амплитуда напряженности электрического поля; w_0 — минимальная перетяжка лазерного пучка; t_0 — время задержки распространения импульса, Δt — длительность импульса; ω_0 — круговая частота световой волны.

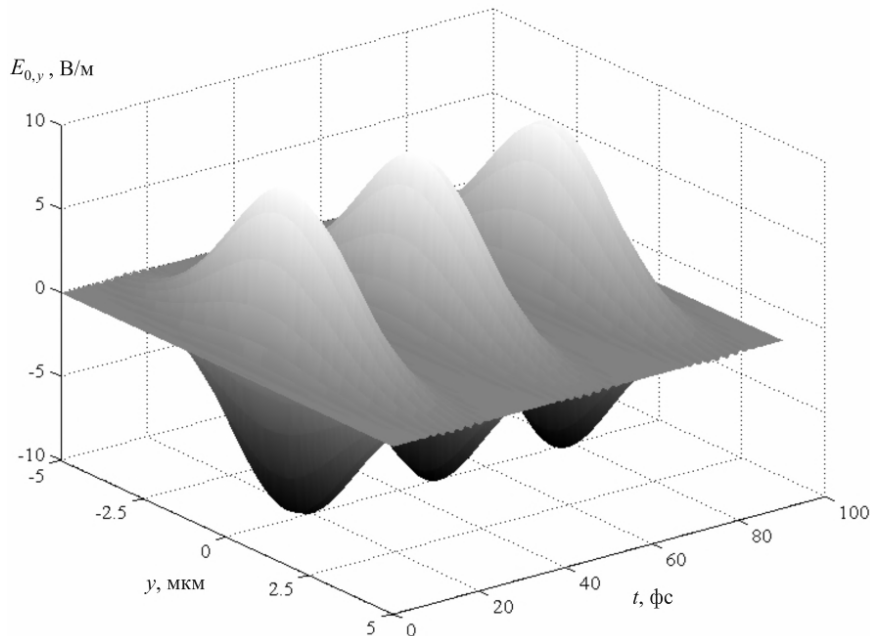


Рис. 5. Входящие световые импульсы

Заполнение области акустооптического взаимодействия акустическими импульсами отражается в исходном уравнении (12) как периодическое изменение показателя преломления [14]. Поскольку скорость света превышает скорость распространения звука в среде на несколько порядков, рассматривается статическое распределение показателя преломления, изображенное на рис. 6.

Для решения поставленной задачи о взаимодействии светового и звуковых импульсов построена векторная конечно-элементная модель области взаимодействия с применением пакета Comsol Multiphysics.

Результаты моделирования для вектора напряженности магнитного поля в разные моменты времени: до входа светового импульса в область акустооптического взаимодействия, при нахождении пучка внутри этой области, и после выхода из нее, приведены на рис. 7, 8 и 9 соответственно. При прохождении оптического импульса через область акустооптического взаимодействия наблюдается дифракция (в рассмотренном случае — дифракция Брэгга), при этом формируются локализованные, как по пространственной, так и по временной координатам, оптические импульсы в области первого дифракционного порядка.

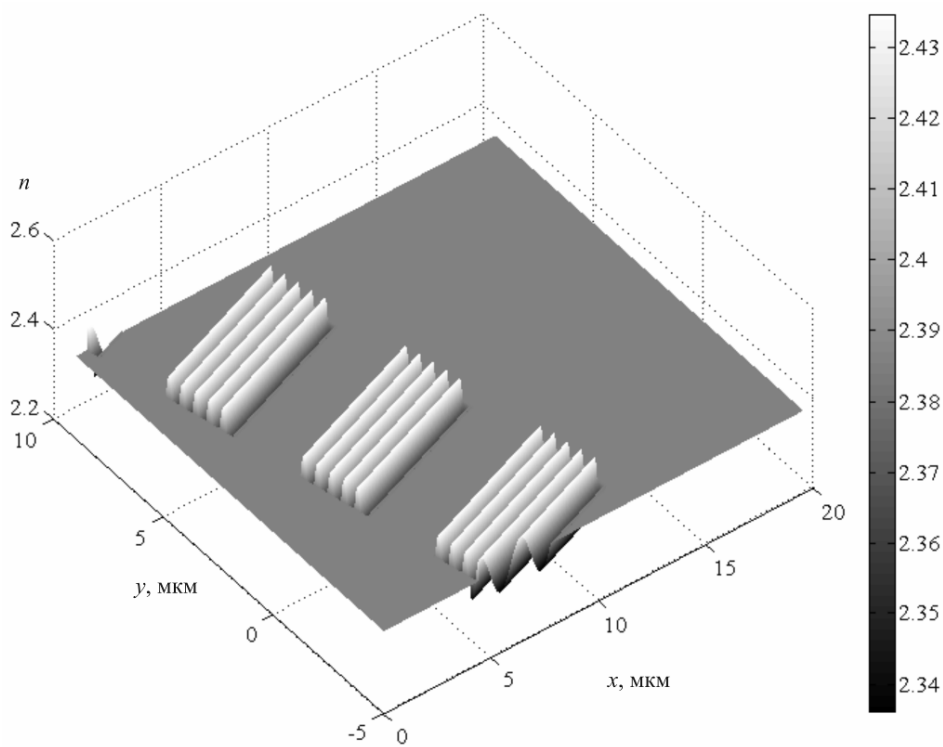


Рис. 6. Распределение показателя преломления среды в области анализа

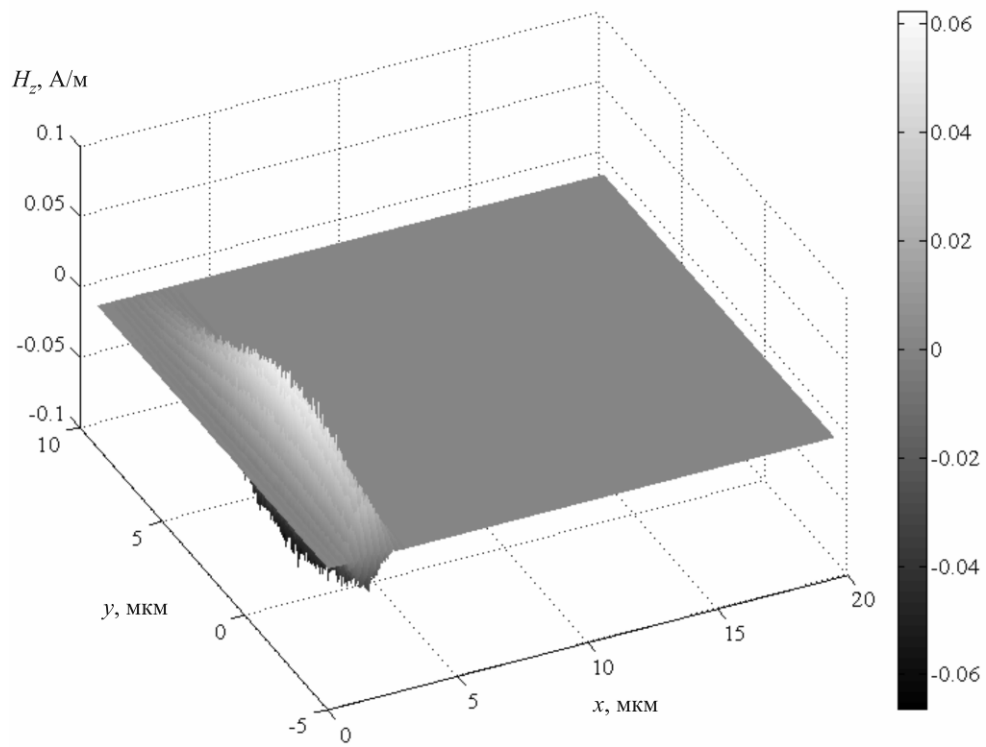


Рис. 7. Напряженность магнитного поля до входа световых импульсов в область акустооптического взаимодействия

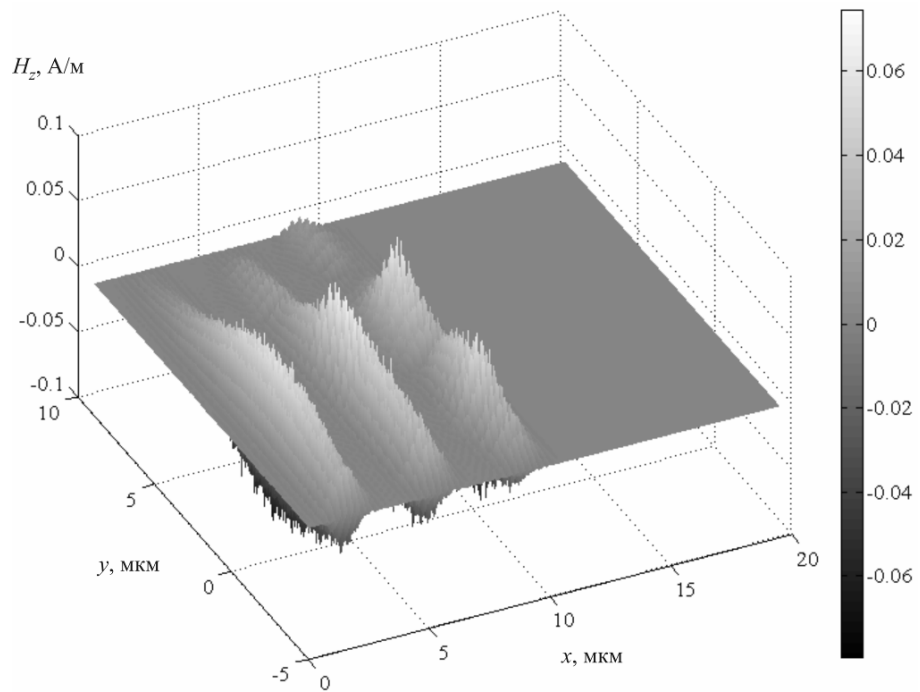


Рис. 8. Напряженность магнитного поля при нахождении светового пучка внутри области акустооптического взаимодействия

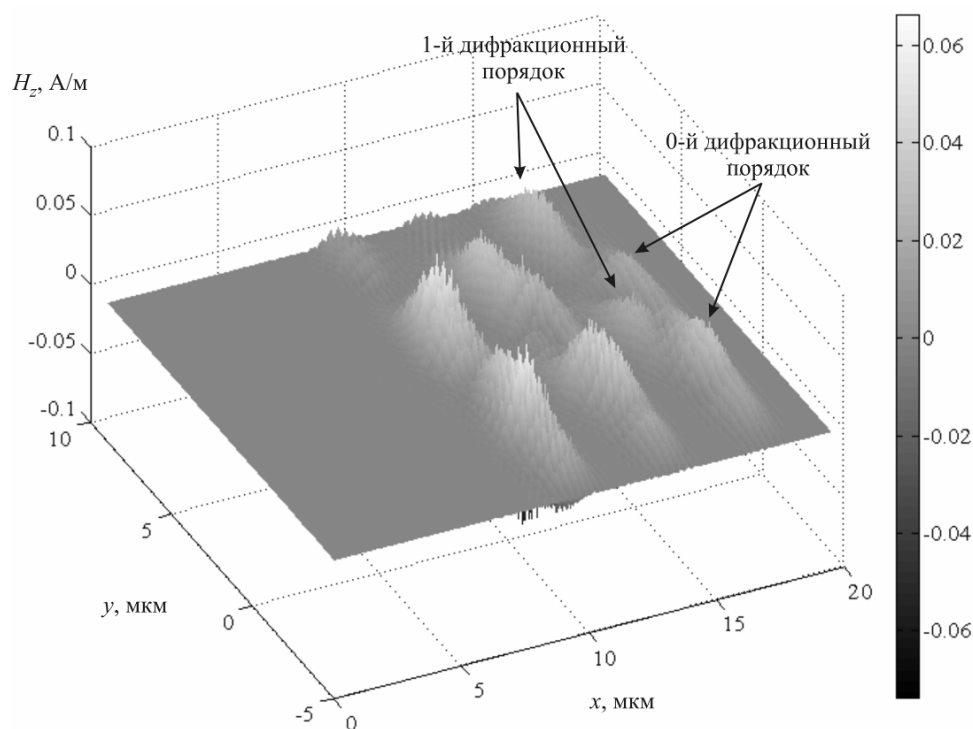


Рис. 9. Напряженность магнитного поля после выхода световых импульсов из области акустооптического взаимодействия

Выводы

В результате рассмотрения пространственно-временного представления дискретных сигналов при акустооптическом взаимодействии получена математическая модель вычислительной среды, число элементов которой (степень интеграции) может быть увеличено за счет увеличения частоты следования оптических и акустических импульсов.

Моделирование взаимодействия световых и акустических импульсов в акустооптической среде двумерным векторным методом конечных элементов показало возможность построения вычислительной среды при малых размерах области ($50\lambda \times 70\lambda$), что может быть положено в основу создания интегральных устройств.

1. Woods D. Parallel and Sequential Optical Computing / Woods D., Naughton T.J. // Optical Super Computing. — 2008. — Vol. 5172. — P. 70–86.

2. Herrera J. 160-Gb/s All-Optical Packet-Switching With In-Band Filter-Based Label Extraction and a Hybrid-Integrated Optical Flip-Flop / Herrera J., Tangdionga E., Liu Y. [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. — 2007. — Vol. 19, N. 13. — P. 990–992.

3. *Asakawa K.* Photonic Crystal Quantum Dot Integrated Circuit for Innovative All-Optical Digital Processor / *Asakawa K.* // 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). — 2008. — P. 18–20.
4. *Белов П.А.* Оптические процессоры: достижения и новые идеи / Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н. [и др.] // Проблемы когерентной и нелинейной оптики: Сборник статей; под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. — 268 с.
5. *Гуляев Ю.В.* Акустооптические устройства обработки аналоговой и цифровой информации / Гуляев Ю.В., Проклов В.В., Соколовский С.В., Сотников В.Н. [и др.] // Радиотехника и электроника. — 1987. — Вып. 1. — С. 169–181.
6. *Рудякова А.Н.* Оптоэлектронные акустооптические устройства обработки дискретной информации / Рудякова А.Н., Липинский А.Ю., Данилов В.В. // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. — 2007. — Т. 5, № 4. — С. 51–59.
7. Функциональные устройства обработки сигналов / [С.А. Баруздин, Ю.В. Егоров, Б. А. Калинин и др.]. — М.: Радио и связь, 1997. — 286 с.
8. *Lipinskii A.Y.* Acoustooptic Binary Coding Based on Space-Time Integration and Its Application to Ultrafast High-Resolution Digital-Analog Conversion / *Lipinskii A.Y., Rudiakova A.N., Danilov V.V.* // IEEE Photonics Technology Letters. — 2008. — Vol. 20, N 24. — P. 2087–2089.
9. *Владимиров В.С.* Обобщенные функции в математической физике / Владимир В.С. — М.: Наука, 1979. — 320 с.
10. *Кеч В.* Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике / Кеч В., Теодореску П. — М.: Мир, 1978. — 518 с.
11. *Балакшиев В.И.* Физические основы акустооптики / Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. — М.: Радио и связь, 1985. — 280 с.
12. *Volakis J.L.* Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications / *Volakis J.L., Chatterjee A., and Kempel L.C.* — New York: IEEE Press and Oxford University Press, 1998. — 368 p.
13. *Jin J.* The Finite Element Method in Electromagnetics / *Jin J.* — New York: J. Wiley & Sons, 2002. — 753 p.
14. *Липинский А.Ю.* Моделирование слабого акустооптического взаимодействия методом конечных элементов во временной области / Липинский А.Ю., Рудякова А.Н., Данилов В.В. // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2006. — Т. 8, № 2. — С. 25–37.

Поступила в редакцию 10.03.2009