

*А.Ю. ЛИПИНСКИЙ, канд. техн. наук, А.Н. РУДЯКОВА, канд. техн. наук,
В.В. ДАНИЛОВ, д-р техн. наук*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

Введение

Оптические компьютерные системы, получившие достаточное распространение, в перспективе могут решить многие проблемы современной вычислительной техники [1, 2]. Одна из таких проблем – ограничение по количеству межсоединений полупроводниковых интегральных схем, может быть преодолена созданием объемных оптических межсоединений с последующим переходом к некогерентным оптическим вычислительным устройствам [3].

Оптоэлектронная акустооптическая вычислительная среда (ОАВС) [4], содержащая блоки памяти на основе фоторефрактивной обратимой запоминающей среды (ФОЗС) [5] представляет собой аналог программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с точки зрения структурной организации [6].

Конфигурирование архитектуры вычислительного устройства на основе ПЛИС осуществляется программированием соответствующих соединений между логическими блоками кристалла [7]. Проводя аналогию ПЛИС – ОАВС можно рассматривать запись дифракционных решеток, задающих конфигурацию объемных межсоединений в ФОЗС как динамическое изменение архитектуры ОАВС.

В статье предложен метод динамического изменения архитектуры ОАВС при помощи реконфигурирования оптических межсоединений каналов обработки данных. Сформулирована математическая модель и проведено моделирование процесса формирования объемных межсоединений ОАВС, рассмотрены ограничения метода.

Динамическое изменение архитектуры ОАВС реконфигурированием объемных межсоединений

В [8, 9] предложены электронные вычислительные системы, содержащие оптические функциональные блоки, обеспечивающие их повышенную производительность. Кроме того, в СБИС [8] допускается реконфигурация связей между логическими вентилями за счет перезаписи статической голограммы.

В ОАВС возможна организация объемных оптических межсоединений в виде матрицы многоканальных дефлекторов [10, 11], сформированной в ФОЗС. Устройство записи информации в фоторефрактивный кристалл содержит две пары акустооптических модуляторов, работающих по схеме параллельной дифракции на встречных акустических пучках, расположенных ортогонально друг к другу [12]. При этом конструкция высокопроизводительного оптоэлектронного вычислительного (НРОС) модуля, описанная в [13], реализуется с тем преимуществом, что вместо использования статичной голограммы, реконфигурирование ОАВС может производиться динамически.

На рис. 1 изображена двухъярусная ОАВС с динамически изменяемой архитектурой. Первый ярус выполняет булево тензорное умножение парафазных входных сигналов, генерируя набор минтермов, заданный конфигурацией межсоединений, в соответствии с принципом двойственности, согласно которому отрицание суммы логических переменных представляет собой, также, произведение их отрицаний. При этом результат логического сложения входных значений, поступающих от матрицы поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL), и перенаправляемых матрицей многоканальных дефлекторов ФОЗС, формируется на выбранном элементе матрицы фотодетекторов, и интерпретируется как соответствующий минтерм.

Следующий ярус ОАВС реализует булево тензорное сложение минтермов первого яруса, генерируя сумму произведений, в соответствии с обобщенной теоремой цифровых вычислений Шеннона.

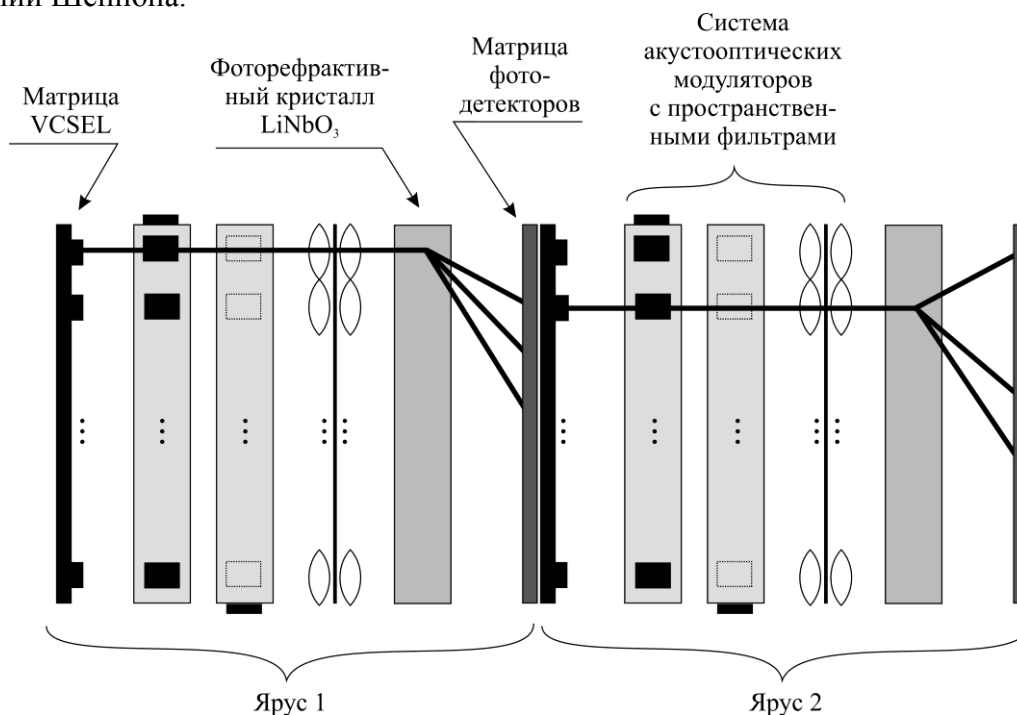


Рис. 1

Моделирование процесса формирования объемных межсоединений ОАВС

Рассмотрим систему акустооптических модуляторов (ярус 1 или ярус 2 ОАВС, рис. 1), которые работают по схеме параллельной дифракции на встречных акустических пучках (рис. 2).

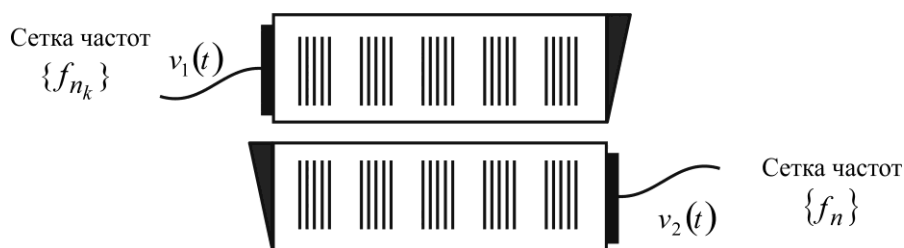


Рис. 2

В [12] показано, что, с учетом линзы и осевой диафрагмы, образующих пространственный фильтр, исключая 0-й порядок дифракции, интенсивность выходного оптического пучка $I_{вых}(x, t)$ определяется выражением

$$I_{вых}(x, t) = \left| j \frac{1}{2} \tilde{v}_1(t - x/V) + j \frac{1}{2} \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right|^2, \quad (1)$$

где V – скорость звука в среде модулятора, $T = W/V$ – время распространения акустической волны в ячейке длиной W , $\tilde{v}_1(t)$ и $\tilde{v}_2(t)$ – аналитические сигналы, соответствующие электрическим сигналам $v_1(t)$ и $v_2(t)$. Для упрощения последующего анализа выражение (1) можно преобразовать к виду [14]:

$$I_{вых}(x, t) = \left(\frac{1}{4} \right) |\tilde{v}_1(t - x/V)|^2 + \left(\frac{1}{4} \right) |\tilde{v}_2(t + x/V - T)|^2 + \left(\frac{1}{2} \right) \text{Re} \left\{ \tilde{v}_1^*(t - x/V) \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right\}. \quad (2)$$

Первые два слагаемых (2) при интегрировании в пределах достаточно большого промежутка времени обращаются в постоянные [14], а третье слагаемое, в зависимости от соотношений несущих частот $\tilde{v}_1(t)$ и $\tilde{v}_2(t)$, а также частот модулирующих сигналов, может представлять некоторое пространственное распределение интенсивности.

Пусть сигналы $v_1(t)$ и $v_2(t)$ определяются выражениями:

$$v_1(t) = b_1(t) \cos(2\pi f_0 t), \quad v_2(t) = b_2(t) \cos(2\pi f_0 t),$$

где $b_1(t)$ и $b_2(t)$ – модулирующие сигналы, f_0 – несущая частота. Соответствующие аналитические сигналы можно записать как

$$\tilde{v}_1(t) = b_1(t) \exp(j2\pi f_0 t), \quad \tilde{v}_2(t) = b_2(t) \exp(j2\pi f_0 t).$$

Тогда для третьего слагаемого (2) получим

$$\left(\frac{1}{2}\right) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{v}_1^*(t - x/V) \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right\} = \left(\frac{1}{2}\right) \operatorname{Re} \left\{ b_1^*(t - x/V) b_2(t + x/V - T) \exp \left[i2\pi f_0 \left(\frac{2x}{V} - T \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

При выборе сигналов $b_1(t) = b_2(t) = A$, где A – некоторое постоянное значение, выражение (3) примет вид:

$$\left(\frac{1}{2}\right) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{v}_1^*(t - x/V) \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right\} = \frac{1}{2} A^2 \cos \left[2\pi f_0 \left(\frac{2x}{V} - T \right) \right]$$

При этом распределение интенсивности $I_{\text{ввх}}(x, t)$ запишется

$$I_{\text{ввх}}(x, t) = I_t(x, t) + \frac{1}{2} A^2 \cos \left[2\pi f_0 \left(\frac{2x}{V} - T \right) \right], \quad (4)$$

где $I_t(x, t)$ – зависящая от времени компонента интенсивности, содержащая сумму зависящих от времени слагаемых $I_{\text{ввх}}(x, t)$.

Как показано в [12], при освещении фоторефрактивного кристалла LiNbO_3 световым потоком с заданным пространственным распределением интенсивности в нем формируется соответствующий фазовый транспарант. Для выражения (4) этот фазовый транспарант будет представлять собой решетку с синусоидальным профилем штриха, с периодом, равным половине длины акустической волны на частоте f_0 .

Предположим, что в один из акустооптических модуляторов (рис. 2) подается многочастотный сигнал с составляющими f_1, f_2, \dots, f_N – сетка частот $\{f_n\}$. В другой АОМ подается сигнал, содержащий только некоторые из частот $\{f_n\}$, т.е. $f_{n_1}, f_{n_2}, \dots, f_{n_K}$ ($K \leq N$) – сетка частот $\{f_{n_k}\}$. В этом случае выражения для $v_1(t)$ и $v_2(t)$ примут вид:

$$v_1(t) = A \sum_{k=1}^K \cos(2\pi f_{n_k} t), \quad v_2(t) = A \sum_{n=1}^N \cos(2\pi f_n t).$$

Соответствующие $v_1(t)$ и $v_2(t)$ аналитические сигналы запишутся как:

$$\tilde{v}_1(t) = A \sum_{k=1}^K \exp(j2\pi f_{n_k} t), \quad \tilde{v}_2(t) = A \sum_{n=1}^N \exp(j2\pi f_n t).$$

Третье слагаемое в (2) будет:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2}\right) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{v}_1^*(t - x/V) \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right\} = \\ & = \frac{A^2}{2} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \exp \left[j2\pi \left\{ (f_n - f_{n_k}) t + (f_n + f_{n_k}) \frac{x}{V} - f_n T \right\} \right] \right\} = \\ & = \sum I_{n_k = n} + \sum I_{n_k \neq n}, \end{aligned}$$

где $\sum I_{n_k=n}$ – суммарное распределение интенсивности для компонент с совпадающими частотами f_{n_k} и f_n :

$$\sum I_{n_k=n} = \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^K \cos \left[2\pi f_{n_k} \left(\frac{2x}{V} - T \right) \right],$$

$\sum I_{n_k \neq n}$ – суммарная интенсивность для компонент с несовпадающими частотами f_{n_k} и f_n , зависящая от времени:

$$\sum I_{n_k \neq n} = \frac{A^2}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \begin{cases} \cos \left[2\pi \left\{ (f_n - f_{n_k})t + (f_n + f_{n_k}) \frac{x}{V} - f_n T \right\} \right], & \text{при } n_k \neq n, \\ 0, & \text{при } n_k = n. \end{cases}$$

Таким образом, для многочастотных сигналов $v_1(t)$ и $v_2(t)$, выражение распределения интенсивности $I_{\text{облх}}(x, t)$ можно записать в виде

$$I_{\text{облх}}(x, t) = I_t(x, t) + \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^K \cos \left[2\pi f_{n_k} \left(\frac{2x}{V} - T \right) \right]. \quad (5)$$

На рис. 3 – 5 приведены результаты моделирования пространственного распределения интенсивности выходного светового пучка, полученные при помощи функциональной модели, построенной в пакете Simulink и аналогичной предложенной в [12], соответствующие четырехчастотному сигналу $v_2(t)$, и одночастотному $v_1(t)$ (рис. 3), двухчастотному $v_1(t)$ (рис. 4), или трехчастотному $v_1(t)$ (рис. 5).

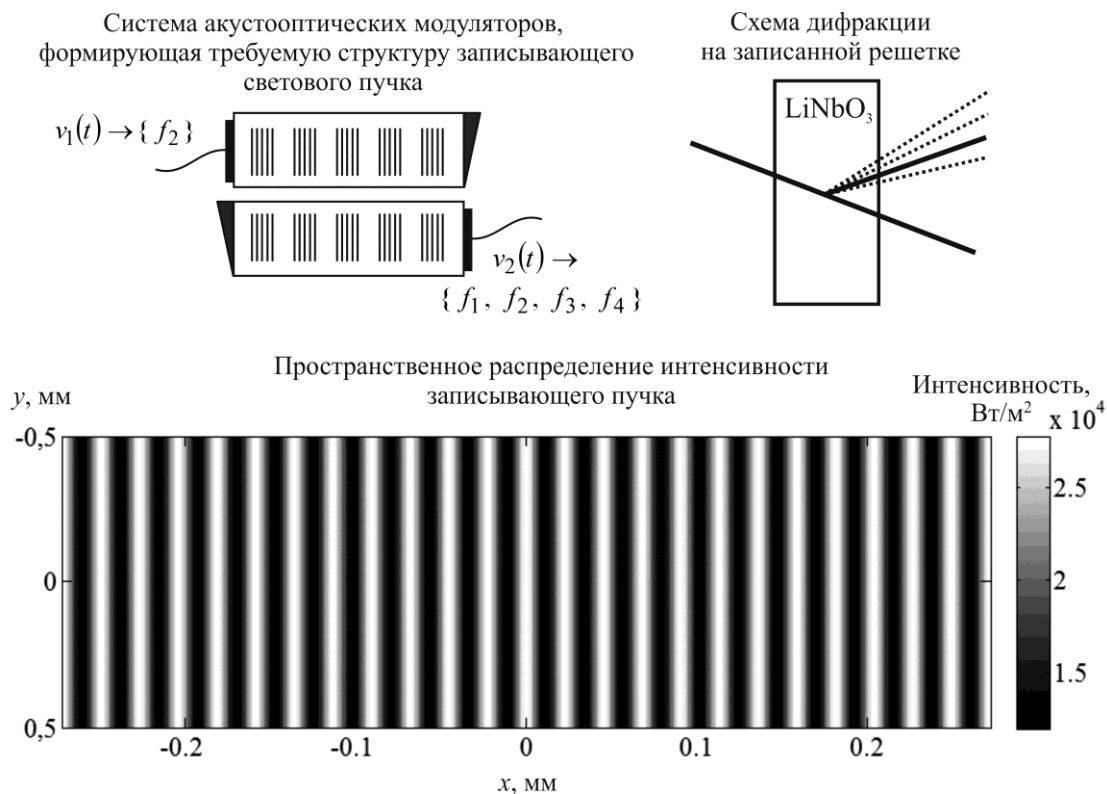


Рис. 3

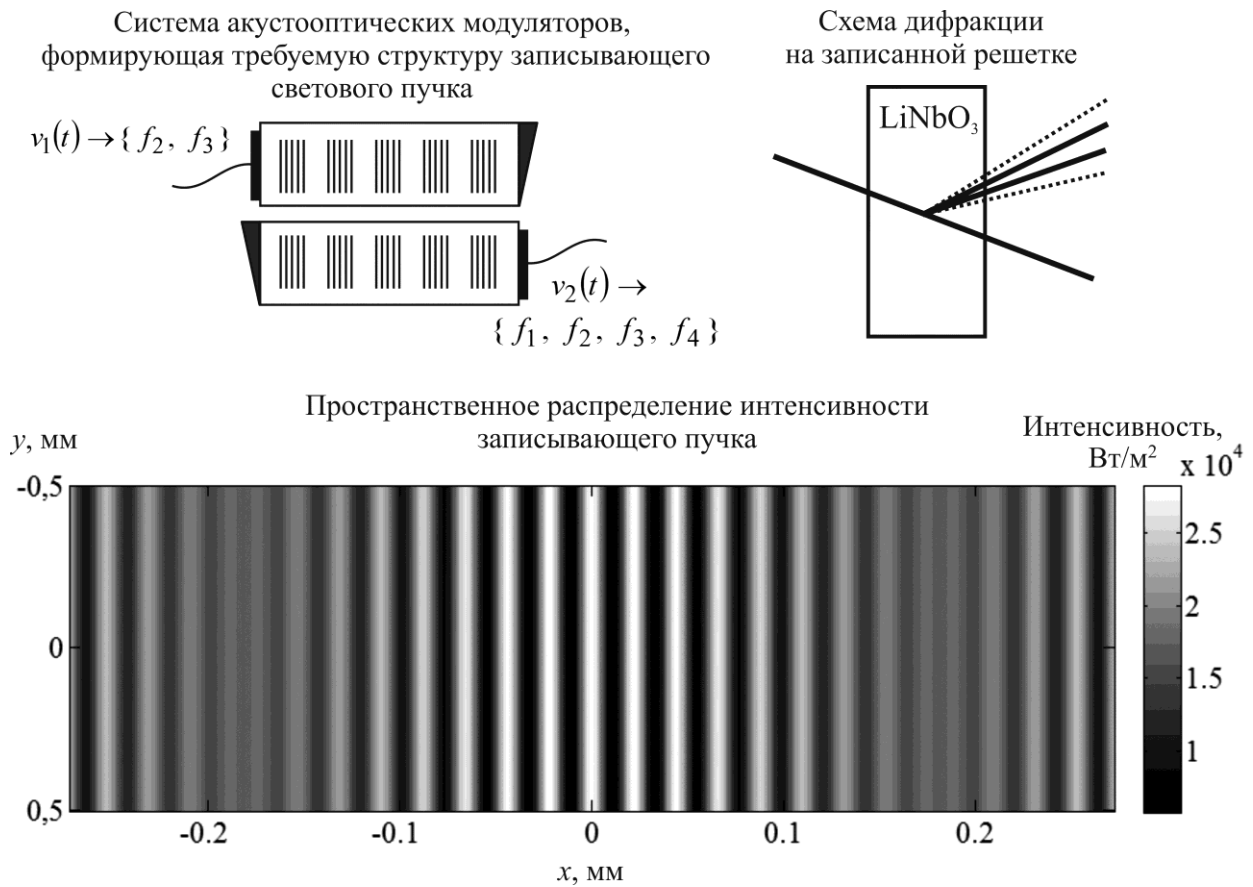


Рис. 4

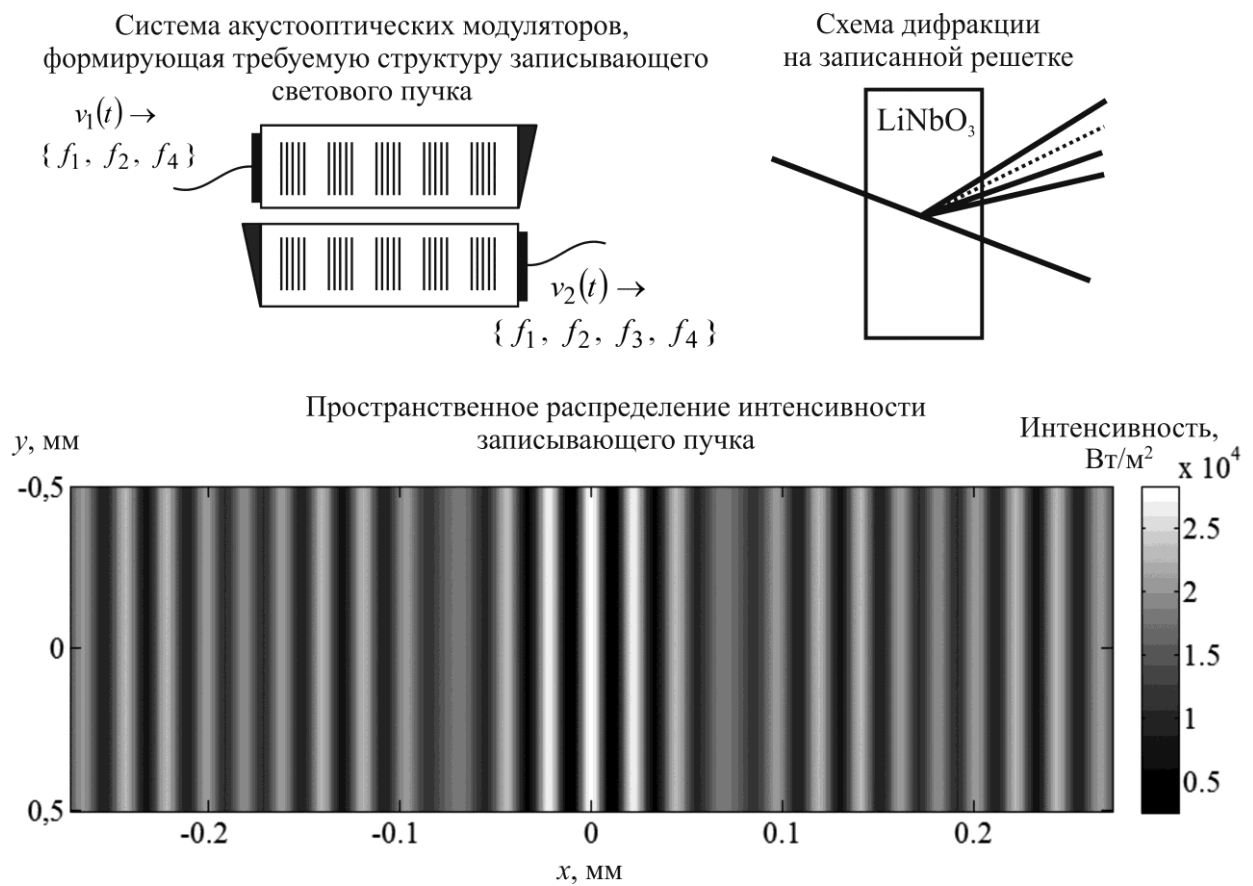


Рис. 5

Как видно из рисунков, результирующее распределение интенсивности можно задавать при помощи выбора нужных частотных компонент в сигнале $v_1(t)$, и, тем самым, выбирать необходимую конфигурацию оптических межсоединений в ФОЗС каждого из ярусов ОАВС. Соответствующие схемы дифракции на рис. 3 – 5 отображают реализацию одного (рис. 3), двух (рис. 4) и трех (рис. 5) межсоединений, в зависимости от частотного состава сигнала $v_1(t)$.

Ограничения метода

Для определения допустимой нестабильности частоты генераторов сигналов $v_1(t)$ и $v_2(t)$, а также возможного разрешения устройства по частоте, выполним анализ интенсивности выходного оптического пучка $I_{вых}(x, t)$ для компонент с несовпадающими частотами. Выражения для аналитических сигналов $\tilde{v}_1(t)$ и $\tilde{v}_2(t)$ запишем в виде:

$$\tilde{v}_1(t) = A \exp\{j2\pi f_0 t\}, \quad \tilde{v}_2(t) = A \exp\{j2\pi(f_0 + \Delta f)t\},$$

где Δf – разница в частотах сигналов $v_1(t)$ и $v_2(t)$. При этом, третье слагаемое (2) представим, как:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} \right) \operatorname{Re} \left\{ \tilde{v}_1^*(t - x/V) \tilde{v}_2(t + x/V - T) \right\} = \\ & = \left(\frac{1}{2} \right) \operatorname{Re} \left\{ A^2 \exp \left[i2\pi \left\{ \Delta f \cdot t + (2f_0 + \Delta f) \frac{x}{V} - (f_0 + \Delta f) T \right\} \right] \right\} = \\ & = \frac{1}{2} A^2 \cos \left[2\pi \left\{ \Delta f \cdot t + (2f_0 + \Delta f) \frac{x}{V} - (f_0 + \Delta f) T \right\} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Распределение интенсивности выходного оптического пучка, с учетом (6), равно:

$$I_{вых}(x, t) = I_t(x, t) + \frac{1}{2} A^2 \cos \left[2\pi \left\{ \Delta f \cdot t + (2f_0 + \Delta f) \frac{x}{V} - (f_0 + \Delta f) T \right\} \right], \quad (7)$$

в котором второе слагаемое представляет собой синусоидальное пространственное распределение, сдвигающееся со скоростью $V_{\Delta f}$:

$$V_{\Delta f} = \frac{\Delta f}{2f_0 + \Delta f} V. \quad (8)$$

При $\Delta f = 0$, выражение (8) также обращается в 0, а (7) – повторяет (4).

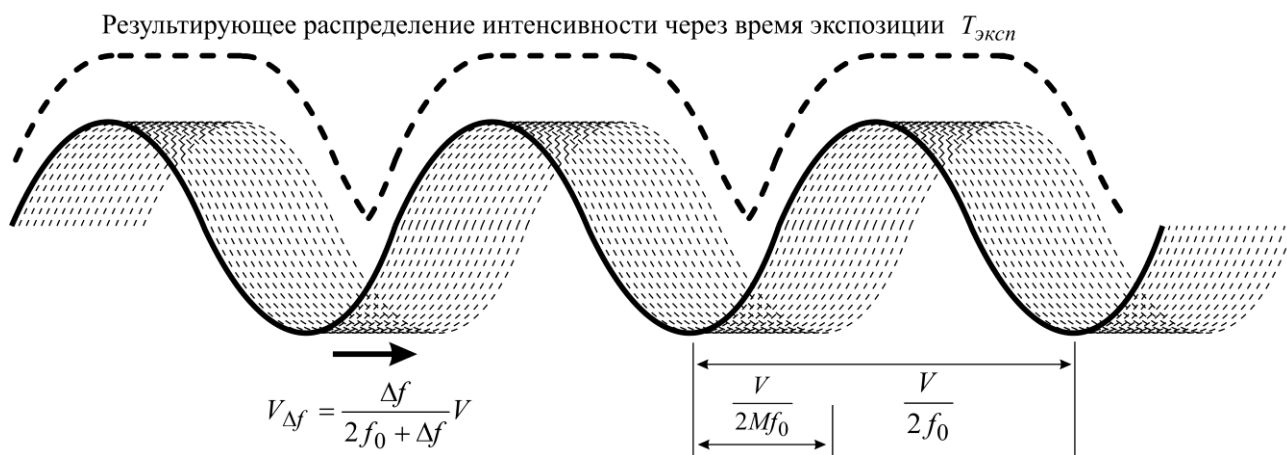


Рис. 6

Для определения допустимой нестабильности частоты потребуем, чтобы за время экспонирования $T_{эксн}$ картина распределения интенсивности смещалась не более, чем на M -ю долю периода записываемой решетки (рис. 6), т.е., не более, чем на $1/(2M)$ длины акустической волны на частоте f_0 . Тогда, с учетом (8), Δf должна удовлетворять следующему неравенству:

$$\Delta f \leq \frac{2f_0}{2Mf_0T_{эксн} - 1}. \quad (9)$$

Разрешающую способность по частоте f_h определим из условия такой разницы частот соседних каналов, которая обеспечивает взаимную засветку даже при нестабильности частоты генераторов. Таким образом, за время экспонирования $T_{эксн}$, картина распределения интенсивности должна смещаться больше, чем на два периода записываемой решетки, и f_h должна удовлетворять неравенству

$$f_h \geq \frac{2f_0}{f_0T_{эксн} - 1}. \quad (10)$$

Выводы

В современных FPGA каждый логический элемент может быть непосредственно связан с десятками соседних логических элементов, таким образом, вычисление функции многих переменных потребует эквивалентной схемы, состоящей из многих ярусов, что, с учетом задержки времени распространения в каждом из ярусов, приводит к понижению быстродействия схемы, а, зачастую, и невозможности удовлетворения временных параметров решаемой задачи. Существующие технологии позволяют получить ОАВС с общим числом каналов порядка 512^2 (512 на одну сторону матрицы). В этом случае, использование объемных межсоединений, реализуемых ФОЗС, позволит двухъярусной ОАВС реализовать вычисление комбинационной функции 250 тысяч логических переменных (1-й ярус – умножение, 2-й – сложение).

Список литературы. 1. *Васильев В.Н., Павлов А.В.* Оптические технологии искусственного интеллекта : учебное пособие. Изд.2. В 2-х т. Т.1. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. – 81с. 2. Оптические устройства в радиотехнике ; под ред. В. Н. Ушакова. – М. : Радиотехника, 2009. – 264 с. 3. *Оптические вычисления* : Сб. статей под ред. Р. Аппатуна. – М. : Мир, 1993. – 441 с. 4. *Lipinskii A.Y., Rudiakova A.N.* Acousto-optic computing environment for stream data processing // *Applied Optics*. – 2011. – vol. 50. – P. 4917-4921. 5. *Липинский А.Ю., Рудякова А.Н., Данилов В.В.* Моделирование процессов записи-чтения фоторефрактивных транспарантов методом распространяющегося пучка // *Регистрация, хранение и обработка данных*. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 16-26. 6. *Липинский А. Ю., Рудякова А.Н.* Оптоэлектронные вычислительные среды с динамически изменяемой архитектурой // *Труды тринадцатой междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии»*, Одесса, 2012. – С. 316. 7. *Стешенко В.Б.* ПЛИС фирмы Altera: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. – М. : «Додэка XXI», 2007. – 576 с. 8. *Seto D., Nakajima M., Watanabe M.* Dynamic optically reconfigurable gate array very large-scale integration with partial reconfiguration capability // *Applied Optics*. – 2010. – vol. 49, no. 36. – P. 6986-6994. 9. *Tamir D.E., Shaked N.T., Wilson P.J., Dolev S.* High-speed and low-power electro-optical DSP coprocessor // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2009. – vol. 26, no. 8. – P. A11-A20. 10. *Antonov S., Vainer A., Proklov V., Rezvov Y.* Switch multiplexer of fiber-optic channels based on multibeam acousto-optic diffraction // *Applied Optics*. – 2009. – vol. 48, no. 7. – P. C171-C181. 11. *Bryant L.M., Dickson J.W., Rodal D.R.* Frequency, phase and amplitude control apparatus and method for acousto-optic deflector optimization. Patent No. 5255257, U.S.A., 1993. 12. *Липинский А.Ю.* Синтез дифракционных решеток в кристалле LiNbO₃ // *Радиотехника*. – 2012. – №169. – С. 343–348. 13. *Guilfoyle P.S., Hessenbruch J.M., Stone R.V.* Free-Space optical interconnects for high performance optoelectronic switching // *IEEE Trans. Comput.* – 1998. – vol. 31. – P. 69-75. 14. *Rhodes W. T.* Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation // *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 1, pp. 65-79, 1981.