

ЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ ЭХО-ГОЛОГРАФИИ

А. Р. Сахбиева^{*}, Л. А. Нефедьев, Г. И. Гарнаева

УДК 535.2+535.317.1

Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Казань, ул. Кремлевская, 16, Россия; e-mail: alsu-sakhbieva@yandex.ru

(Поступила 10 октября 2016)

Рассмотрена реализация логических операций над множествами, представленными в виде изображений, с помощью стимулированной эхо-голограммы. Показано, что стимулированная эхо-голограмма может быть использована для реализации логической операции пересечения множеств.

Ключевые слова: эхо-голография, волновой фронт, стоячие волны, логическая операция с множествами.

The implementation of logical operations on sets represented in the form of images is considered using a stimulated echo hologram. It is shown that the stimulated echo hologram can be used to implement the logical operation of the set intersection.

Keywords: echo holography, wave front, standing waves, logical operation with sets.

Развитие когерентной оптики и голографии началось с появлением лазеров. С тех пор стала возможна реализация ряда вычислительных операций с помощью оптических методов. Оптические методы обработки информации позволяют одновременно работать с большими объемами информации с высокой скоростью их обработки и осуществлять целый ряд интегральных операций над двумерными массивами информации. Использование различных комбинаций параметров светового когерентного излучения (амплитуды, частоты, фазы, поляризации, разрешаемых элементов в изображении (пиксели)) может быть реализован процесс передачи и обработки информации в больших объемах с высокой скоростью.

В данной работе рассматривается эхо-голографический метод обработки информации, где выполняются логические операции с изображениями с помощью оптических процессоров. Существуют два вида процессоров: логические процессоры, осуществляющие реализацию строго определенного набора логических операций, и системы логического вывода, обычно называемые нечеткой ассоциативной памятью, которые реализуют сложные операции, относящиеся к классу нечетких ассоциаций.

Для процессоров первого вида предложены различные архитектуры, которые используют матричные источники и приемники излучения, такие как линейки [1], двумерные матрицы [2—4] и более сложные схемы на их основе [5—9], также комбинированные с системой памяти [10], системы распознавания [11] и морфологической обработки [12] изображений. Процессоры второго вида реализуют, как правило, логический вывод [12—19]. Так, в [17] применяется пространственно-неинвариантный коррелятор совместного преобразования для независимого вычисления функции принадлежности ассоциаций входа с каждым эталонным значением. Фурье-оптика используется для генерации набора значений функции принадлежности, которые соответствуют результату применения каждого логического правила к входному значению [18, 19].

Первые оптические процессоры разработаны в 80-х гг. XX в. В них использовались специальные элементы, где свет должен управлять светом, а логические операции осуществлялись за счет взаимодействия света с веществом. В 1990 г. компанией Bell разработан макет оптического устройства, где

THE LOGICAL OPERATION OF THE SET INTERSECTION FOR IMAGES IN THE OPTICAL ECHO HOLOGRAPHY

A. R. Sakhbieva^{*}, L. A. Nefed'ev, G. I. Garnaeva (Institute of Physics, Kazan (Volga region) Federal University, 16 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russia; e-mail: alsu-sakhbieva@yandex.ru)

выполнение логических и арифметических операций происходило с очень высоким быстродействием. В 2003 г. компанией Lenslet создан оптический процессор EnLight256, в котором операции выполнялись благодаря возможностям управлять потоком света, за счет чего производительность составляла $8 \cdot 10^{12}$ операций/с [20].

На сегодняшний день представляет интерес разработка процессоров, которые являются многофункциональными устройствами, позволяющими выполнять интегральные преобразования над сигналами в режиме реального времени. Они основаны на использовании эхо-голографии [21]. В отличие от традиционного метода записи голограмм эхо-голограммы (ЭГ) формируются не путем интерференции объектного и опорного полей, а в результате интерференции атомных состояний. Суперпозиционные состояния появляются в течение переходного процесса и существуют до конца релаксации неравновесной атомной поляризации, формирующейся под действием когерентного излучения. Таким образом, запись динамических ЭГ в условиях когерентного нелинейного взаимодействия объектного и референтного лазерных импульсов с резонансной средой дает возможность запоминать и воспроизводить информацию о динамических процессах, связанных с изменением состояний в пространстве и времени. В таких голограммах содержится информация о пространственно-временной структуре поля объектной волны. Особое внимание привлекает способность ЭГ восстанавливать или обращать волновые фронты и временную форму объектных лазерных импульсов, что может быть использовано в системах оперативной обработки информации. В [22] показано, что воздействие импульсов нерезонансных электромагнитных стоячих волн между возбуждающими лазерными импульсами при формировании стимулированной эхо-голограммы (СЭГ) приводит к преобразованию волнового фронта в ее отклике. В [23] установлено, что воздействие нерезонансных стоячих электромагнитных волн при записи СЭГ позволяет управлять изображением в отклике СЭГ. В работах [24—26] впервые продемонстрированы возможности СЭГ по воспроизведению, свертке и корреляции изображений, заложенных в возбуждающие лазерные импульсы. СЭГ позволяет записывать, воспроизводить и преобразовывать изображения с большой скоростью. Поскольку сами изображения представляют собой множества точек, СЭГ может быть использована для осуществления логических операций с изображениями.

В данной работе рассмотрена операция пересечения множеств A и B в отклике СЭГ, т. е. множество, состоящее только из тех элементов, которые принадлежат одновременно как множеству A , так и множеству B . На рис. 1 представлены логические операции $C = A \cap B = \{x | x \in A, x \in B\}$ и $C = A \cap B \cap D = \{x | x \in A, x \in B, x \in D\}$. Для реализации логической операции пересечения множеств для изображений с помощью СЭГ в качестве множеств A , B и D взяты изображения, заложенные в первый, второй или третий возбуждающие лазерные импульсы.

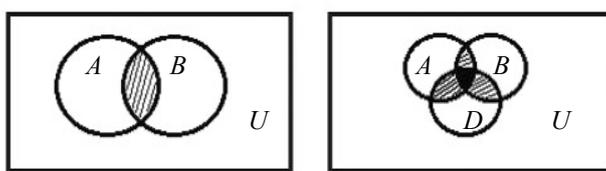


Рис. 1. Диаграммы Эйлера—Венна для операции пересечения множеств

Рассмотрим формирование СЭГ в случае, когда в каждый из возбуждающих лазерных импульсов заложено определенное изображение, считанное с соответствующего транспаранта. Для исключения влияния временной формы возбуждающих лазерных импульсов на фильтрацию и преобразование изображений в СЭГ длительность каждого η -го возбуждающего импульса Δt_η должна быть достаточно малой, чтобы его фурье-спектр перекрывал неоднородную ширину линии резонансного перехода: $1/\Delta t_\eta \gg \sigma$. Кроме того, для когерентного взаимодействия возбуждающих лазерных импульсов с резонансной средой $\Delta t_\eta \ll T_1, T_2$, где T_1 и T_2 — времена продольной и поперечной необратимой релаксации рассматриваемой системы, σ — ширина неоднородно уширенной линии резонансного перехода.

Напряженность электрического поля η -го возбуждающего лазерного импульса

$$E_\eta(\mathbf{r}, t) = U_\eta(\mathbf{r})e^{i\omega t} + \text{к.с.}, \quad 0 \leq t \leq \Delta t_\eta, \quad (1)$$

где $U_\eta(\mathbf{r})$ описывает его пространственную структуру.

Рассмотрим приближения, когда $U_\eta(\mathbf{r})$ можно разложить по сферическим или плоским волнам. Изображение на транспаранте считаем совокупностью точек с радиусами-векторами \mathbf{r}_n . Каждая такая точка излучает сферическую волну. Совокупность волн на месте нахождения j -го оптического центра в образце с радиусом-вектором \mathbf{r}_{0j} дает возмущение резонансного перехода оптического центра. Тогда напряженность электрического поля объектного лазерного импульса в точке \mathbf{r}_{0j} :

$$E_j = \sum_n A_{nj} e^{i\mathbf{k}_n(\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n)-i\omega t+i\varphi_n} / |\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_n = \omega/c\mathbf{n}_n$, $\mathbf{n}_n = \mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n/|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|$; φ_n — начальные фазы сферических волн, причем $\exp\{i\varphi_n\}$ можно включить в комплексные амплитуды A_{nj} . Если $|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|$ значительно больше размеров образца, то разложение (2) по сферическим волнам переходит в разложение по плоским волнам:

$$E_j = \sum_n \varepsilon_n \exp\{i\mathbf{k}_n\mathbf{r}_{0j}-i\omega t\}, \quad (3)$$

где ε_n — амплитуды напряженности электрических полей волн от отдельных точек объекта. Так как каждый из возбуждающих лазерных импульсов является носителем изображения, пространственный фазовый синхронизм при формировании СЭГ имеет вид:

$$\mathbf{k}_{en} = -\mathbf{k}_{1n'} + \mathbf{k}_{2n''} + \mathbf{k}_{3n'''}. \quad (4)$$

На рис. 2 показан пространственный фазовый синхронизм в случае формирования обращенной СЭГ. Отметим, что для получения необходимого набора волновых векторов плоских волн возможна установка перед каждым транспарантом матового стекла. Тогда будут существовать только те компоненты разложения поля отклика, для которых оказываются ненулевыми амплитуды разложения полей возбуждающих импульсов, соответствующие представленным направлениям волновых векторов.

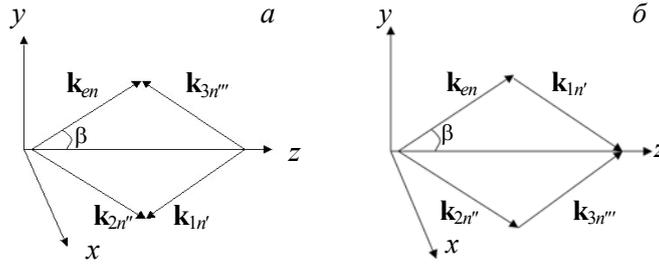


Рис. 2. Обращенный (а) и необращенный (б) режимы СЭГ

Удобно задать вектор $\mathbf{k}_{\eta n}$ в системе координат $(x_{\eta n}, y_{\eta n}, z_{\eta n})$, связанных с направлением распространения компонент разложения объектных лазерных полей:

$$\mathbf{k}_{\eta n} = \mathbf{i}_{\eta n}k_{x\eta n} + \mathbf{j}_{\eta n}k_{y\eta n} + \mathbf{k}_{\eta n}k_{z\eta n}, \quad (5)$$

где $(\mathbf{i}_{\eta n}, \mathbf{j}_{\eta n}, \mathbf{k}_{\eta n})$ — орты системы координат $(x_{\eta n}, y_{\eta n}, z_{\eta n})$. Тогда в лабораторной системе координат (x, y, z) :

$$\begin{pmatrix} k_x^{(\eta n)} \\ k_y^{(\eta n)} \\ k_z^{(\eta n)} \end{pmatrix} = A(\alpha_{\eta n}, \beta_{\eta n}, \gamma_{\eta n}) \begin{pmatrix} k_{x_{\eta n}} \\ k_{y_{\eta n}} \\ k_{z_{\eta n}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где A — матрица вращений. Из (6) следует

$$\begin{aligned} k_x^{(\eta n)} &= k_{x_{\eta n}}(\cos\alpha_{\eta n}\cos\beta_{\eta n}\cos\gamma_{\eta n} - \sin\alpha_{\eta n}\sin\gamma_{\eta n}) - k_{y_{\eta n}}(\cos\alpha_{\eta n}\cos\beta_{\eta n}\sin\gamma_{\eta n} + \sin\alpha_{\eta n}\cos\gamma_{\eta n}) + k_{z_{\eta n}}\cos\alpha_{\eta n}\sin\beta_{\eta n}, \\ k_y^{(\eta n)} &= k_{x_{\eta n}}(\sin\alpha_{\eta n}\cos\beta_{\eta n}\cos\gamma_{\eta n} + \cos\alpha_{\eta n}\sin\gamma_{\eta n}) + k_{y_{\eta n}}(-\sin\alpha_{\eta n}\cos\beta_{\eta n}\sin\gamma_{\eta n} + \cos\alpha_{\eta n}\cos\gamma_{\eta n}) + k_{z_{\eta n}}\sin\alpha_{\eta n}\sin\beta_{\eta n}, \\ k_z^{(\eta n)} &= -k_{x_{\eta n}}\sin\beta_{\eta n}\cos\gamma_{\eta n} + k_{y_{\eta n}}\sin\beta_{\eta n}\sin\gamma_{\eta n} + k_{z_{\eta n}}\cos\beta_{\eta n}. \end{aligned}$$

Здесь $\alpha_{\eta n}$, $\beta_{\eta n}$ и $\gamma_{\eta n}$ — углы Эйлера, определяющие взаимную ориентацию систем координат (x, y, z) и $(x_{\eta n}, y_{\eta n}, z_{\eta n})$. Если волновые векторы расположены в плоскости YOZ (плоскость сечения транспаранта), а $\mathbf{k}_{\eta n} \parallel z_{\eta n}$, то

$$k_x^{(\eta n)} = 0, k_y^{(\eta n)} = k_{z_{\eta n}}\sin\beta_{\eta n}, k_z^{(\eta n)} = k_{z_{\eta n}}\cos\beta_{\eta n}. \quad (7)$$

Пространственная структура отклика СЭГ определяется выражением

$$I \sim EE^*,$$

$$E \approx \frac{1}{V} \sum_{n', n'', n'''} \int dV \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta) d\Delta \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \frac{\varepsilon_{1n'}^* \varepsilon_{2n''} \varepsilon_{3n'''} e^{-i(\mathbf{k}_{en} + \mathbf{k}_{1n'} - \mathbf{k}_{2n''} - \mathbf{k}_{3n'''})\mathbf{r}}}{\left| \sum_{n'} \varepsilon_{1n'}^* e^{-ik_{1n'}\mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n''} \varepsilon_{2n''} e^{ik_{2n''}\mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n'''} \varepsilon_{3n'''} e^{ik_{3n'''}\mathbf{r}} \right|} e^{-i(\mathbf{k}_{en} + \mathbf{k}_{1n'} - \mathbf{k}_{2n''} - \mathbf{k}_{3n'''})\mathbf{r}}, \quad (8)$$

где θ_η — площадь η -го импульса; V — объем возбуждаемой части образца; $g(\Delta)$ — распределение оптических центров по частотам; $\Delta = \omega - \Omega_0$ — сдвиг отдельной изохроматы; ω — частота лазерного излучения; Ω_0 — частота резонансного перехода. Фазовый синхронизм в (8) осуществляется в случае, если длины волновых векторов и их пересечений не выходят за пределы неоднородно уширенной линии резонансного перехода. С учетом $|\mathbf{k}| = \omega^2/c(\omega - \Delta)$ и приближения (7) выражение (8) можно упростить:

$$E \approx \frac{1}{L_y L_z} \int_0^{L_y} dy \int_0^{L_z} dz \int_0^{\beta_{\max}} d\beta \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta) d\Delta \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \varepsilon_1^*(\beta) \varepsilon_2(\beta) \varepsilon_3(\beta) \times \\ \times \exp\{i[\omega^2(2\cos\beta - 2\cos(\beta + \Delta\beta))/c(\omega - \Delta)]z + i[\omega^2(2\sin\beta - 2\sin(\beta + \Delta\beta))]y\},$$

или

$$E \approx \frac{1}{L_y L_z} \int_0^{L_y} dy \int_0^{L_z} dz \int_0^{\beta_{\max}} d\beta \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta) d\Delta \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \varepsilon_1^*(\beta) \varepsilon_2(\beta) \varepsilon_3(\beta) \times \\ \times \exp\{i(4\omega^2/c(\omega - \Delta))\sin(\Delta\beta/2)[\sin(\beta + \Delta\beta/2)z + \cos(\beta + \Delta\beta/2)y]\}, \quad (9)$$

где $\Delta\beta$ — среднее значение отклонения угла от фазового синхронизма; L_y, L_z — размер образца вдоль осей y и z в лабораторной системе координат. Выражения (8) и (9) определяют распределение интенсивности в плоскости изображения, получаемого в отклике СЭГ.

Рассмотрим процесс записи изображения транспаранта с помощью СЭГ и осуществим операцию пересечения нескольких множеств (рис. 3). На рис. 3, а представлена схема возбуждения СЭГ в случае, когда в каждый возбуждающий лазерный импульс (P_1, P_2, P_3) закладывается соответствующее изображение. Полученный отклик СЭГ содержит изображение, где прозрачные участки принадлежат одновременно множествам A, B, F . Изображения, которые представляют собой множества A, B, F, D , могут быть любой структуры. Для удобства выберем их в виде чередования прозрачных и непрозрачных полос (рис. 3, б). Импульсу P_1 соответствует множество A, P_2 — B, P_3 — F . Следовательно, полученный отклик СЭГ P_3 можно представить как множество C_1 , которое является результатом логической операции пересечения множеств A, B . Модель логической операции для данного процесса

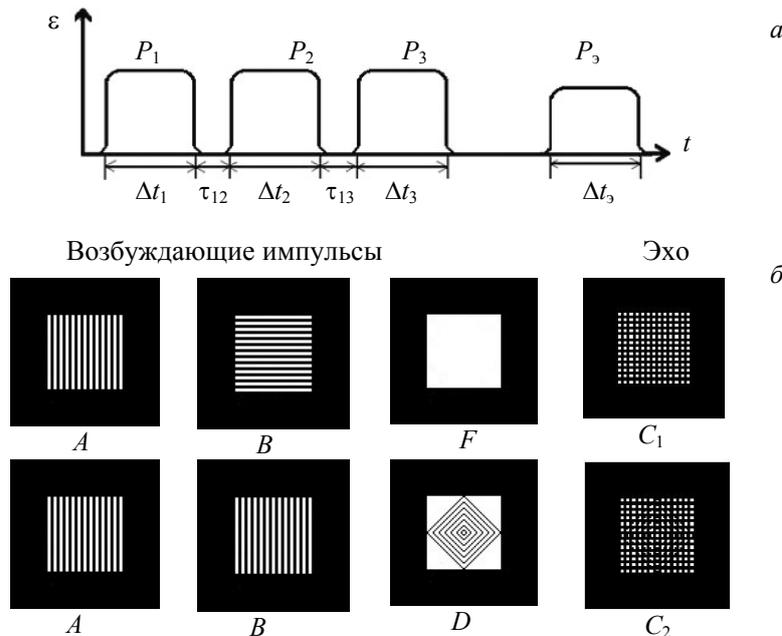


Рис. 3. Схема возбуждения СЭГ (а): P_1, P_2, P_3 — возбуждающие импульсы, P_3 — сигнал эха; б — изображения в виде множеств A, B, F, D, C_1, C_2 (C_1, C_2 — результат логической операции пересечения множеств)

имеет вид: $A \cap B = C_1$. Аналогичную логическую операцию можно осуществить в случае, когда импульсу P_3 соответствует множество D . Результатом данной операции является множество C_2 , и для него справедлива операция пересечения $A \cap B \cap D = C_2$ (рис. 3, б). В результате полученный отклик СЭГ содержит изображение, образованное из участков пересечения множеств, которые принадлежат A , B или A , B , D (прозрачные области в C_1 , C_2). Данная операция справедлива как для обращенного, так и для необращенного режима записи СЭГ.

Создание эхо-голографического процессора предполагает разработку методов осуществления логических операций непосредственно самим процессором. Рассмотрена реализация логических операций над множествами, представленными в виде изображений, с помощью стимулированной эхо-голограммы, а именно логической операции пересечения множеств. Реализация логических операций над изображениями позволяет решать такие задачи, как распознавание образов и обнаружение различных элементов и объектов на изображениях, а также выполнение вычислительных операций.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

- [1] M. L. Arestova, A. Yu. Bykovsky. *Photon. Optoelectron.*, **2**, N 4 (1994) 169—180
- [2] S. Lin, S. Zhang, C. Chen. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **6** (1993) 106—109
- [3] S. Zhang, C. Chen. *Opt. Commun.*, **107** (1994) 11—16
- [4] S. Lin, S. Zhang, C. Chen, I. Kumazawa. *Opt. Commun.*, **97** (1993) 162—166
- [5] T. Konishi, J. Tanida, Y. Ichioka. *Appl. Opt.*, **34** (1995) 3097—3102
- [6] S. Zhang, M. A. Karim, X. Chen, M. F. Alam. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **16** (1997) 44—48
- [7] H. Jing, L. Liu, F. Qian. *Optic (Stuttgart)*, **110** (1999) 471—475
- [8] H. J. Caulfield. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, **4**, N 2 (1996) 206—208
- [9] H. J. Caulfield. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **19** (1998) 332—333
- [10] T. Jiang, Y. Li. *Opt. Engin.*, **38** (1999) 477—484
- [11] R. Srinivasan, J. Kinsler, M. Schamschula. *Opt. Lett.*, **21**, N 11 (1996) 815—817
- [12] J. Zhang, L. Liu, G. Li, L. Shao. *Appl. Opt.*, **36**, N 11 (1997) 2328—2333
- [13] H. Itoh, S. Mukai, H. Yajima. *Appl. Opt.*, **33** (1994) 1485—1490
- [14] H. Itoh, T. Yamada, S. Mukai, M. Watanabe, D. Brandl. *Appl. Opt.*, **36** (1997) 808—812
- [15] S. Zhang, M. A. Karim. *Opt. Lett.*, **23** (1998) 292—294
- [16] S. Zhang, M. A. Karim. *Opt. Laser Technol.*, **32** (2000) 407—412
- [17] S. Zhang, M. A. Karim. *Opt. Engin.*, **40**, N 11 (2001) 2400—2406
- [18] E. Gur, D. Mendlovic, Z. Zalevsky. *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6937—6945
- [19] Z. Zalevsky, D. Mendlovic, E. Gur. *Appl. Opt.*, **39**, N 2 (2000) 333—336
- [20] В. Г. Беспалов. Основы оптоинформатики, Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО (2006)
- [21] Л. А. Рассветалов, В. В. Самарцев. *Вестн. Новгород. гос. ун-та*, № 19 (2001)
- [22] А. Р. Сахбиева, Л. А. Нefeld'ev, Г. И. Гарнаева. *Журн. прикл. спектр.*, **82**, № 5 (2015) 792—795
- [A. R. Sakhbieva, L. A. Nefed'ev, G. I. Garnaeva. *J. Appl. Spectr.*, **82**, N 5 (2015) 792—795]
- [23] G. I. Garnaeva, L. A. Nefediev, A. R. Sakhbieva. *Opt. Photon. J.* (2016) 1—7
- [24] E. Y. Xu, S. Kroll, D. L. Huestis, R. Kachru, M. K. Kim. *Opt. Lett.*, **15**, N 10 (1990) 562—564
- [25] X. A. Shen, R. Kachru. *Opt. Lett.*, **17**, N 7 (1992) 520—522
- [26] Xiao A. Shen, An-Dien Nguyen, J. W. Perry, D. L. Huestis. *Science*, **278**, N 3 (1997) 96—100