

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев В. А., Орлов Е. Ф. Оптические анализаторы.— М.: Сов. радио, 1971.
2. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины.— М.: Мир, 1974.
3. Chavel P., Lowenthal. A Method of Incoherent Optical-Image Processing Using Synthetic Holograms.— J. Opt. Soc. Am., 1976, vol. 66, p. 14—23.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику.— М.: Наука, 1978, ч. II.
5. Потатуркин О. И., Хоцкин В. И. Голографический метод обработки изображений в пространственно-некогерентном монохроматическом свете.— В кн.: Оптическая обработка информации. Л.: ФТИ, 1979, с. 61—66.
6. Посконный Г. И., Иванченков В. П., Онюшев Н. Ф. Двумерная фильтрация сейсмических записей в оптико-электронной системе с некогерентным источником излучения.— В кн.: Тез. докл. VII Всесоюз. семинара по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации. М.: Ин-т проблем управления, 1971, с. 59—60.
7. Посконный Г. И., Иванченков В. П. Исследование некоторых возможностей оптико-электронных вычислительных устройств с пространственно-некогерентными источниками излучения.— В кн.: Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ФТИ, 1979, с. 38—49.
8. Дженкинс Дж., Ватс Д. Спектральный анализ и его приложения.— М.: Мпр, 1971, т. 1.

Поступила в редакцию 10 ноября 1982 г.

УДК 535.681.7 : 534.781

Г. К. ИВАНОВА

(Горький)

### ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД УМНОЖЕНИЯ МАТРИЦ И ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Оптическим когерентным и некогерентным методам умножения матриц посвящен ряд работ [1—4]. Эти методы необходимы при решении большого класса задач (фильтрация изображений, многоканальная обработка информации, вычисление корреляционных функций двумерных изображений). Основная трудность применения оптического когерентного метода, описанного в [1, 2], заключается в изготовлении голографического фильтра. В работе [3] это устраняется путем использования цилиндрической оптики и клиновых растров. В [4] показана возможность оптического умножения матриц в некогерентном свете с помощью цилиндрической оптики.

В данном сообщении предлагается оптический метод умножения матриц, основанный на последовательном совмещении строк и столбцов перемножаемых матриц, записанных на транспаранты и освещаемых некогерентным светом. Рассмотрен пример вычисления корреляционных матриц спектров речевых сигналов.

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Для выполнения математической операции

$$\vec{c}_{ik} = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_{jk} \quad (1)$$

изготавливаются транспаранты, пропускание которых по интенсивности светового потока пропорционально величине матричных элементов  $a_{ij}$ ,  $b_{jk}$ , где  $b_{kj}$  — транспонированная матрица  $b_{jk}$ . Источник некогерентного света 1, показанный на рис. 1, с помощью коллиматора 2 освещает последовательно расположенные транспаранты 3, 4 с записями матриц  $a$ ,  $b$ ; строки и столбцы записей совмещены. Щелевая диафрагма 5, ориентированная вдоль строки (ось  $x$ ), имеет ширину, равную ширине строки записи матриц на транспаранты. Оба транспаранта перемещаются относительно друг друга в направлении оси  $y$  (перпендикулярно стро-

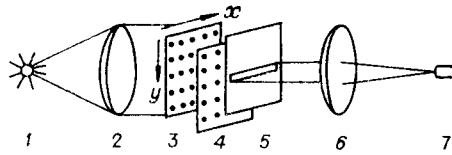


Рис. 1.

мирования перемноженных элементов. В результате каждое совмещение строк определяет один элемент матрицы  $c$ :

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^N a_{ij} \tilde{b}_{kj} = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_{jk}. \quad (2)$$

Элементы строки  $i$  матрицы  $c$  вычисляются последовательным совмещением строк матрицы  $\tilde{b}$  со строкой  $i$  матрицы  $a$ . Путем перемещения матрицы  $a$  относительно целевой диафрагмы последовательно могут быть получены все строки матрицы  $c$ . При перемножении матриц с конечным числом строк (столбцов) транспарант 3 смещается на одну строку после полного цикла смещения транспаранта 4; при перемножении изображений скорости смещения транспарантов выбираются таким образом, что в течение времени полного смещения транспаранта 4 транспарант 3 можно считать неподвижным. На выходе системы ток фотоприемника 7 пропорционален величине элементов искомой матрицы  $c$ . Сигнал с фотоприемника может быть введен в ЭВМ либо преобразован в световой и зарегистрирован на фотопленку в виде раstra, образованного элементами матрицы  $c_{ik}$ , синхронно с производимым умножением матриц. Число элементов перемножаемых матриц в данной схеме лимитируется возможностями записи матриц на транспаранты и бывает достаточно большим (при плотности записи 5 лин/мм и размерах транспарантов  $50 \times 50$  мм<sup>2</sup>,  $N \times N = 250 \times 250$ ). В качестве матриц могут рассматриваться также изображения функций двух переменных, так как число элементов в изображении всегда является конечным и определяется способом регистрации изображения. Такие изображения будем называть непрерывными матрицами. Умножение матриц с отрицательными элементами можно осуществить путем алгебраического суммирования элементов произведения частных матриц, составленных из положительных и отрицательных элементов, как это делается, например, в [4], или путем записи исходных матриц относительно среднего уровня пропускания. Это приведет к сокращению динамического диапазона элементов перемножаемых матриц, но позволит произвести умножение знакопеременных матриц за один цикл работы системы.

Рассмотрим использование предложенного метода умножения матриц в задаче распознавания речевых образов [5]. В последнее время в задаче идентификации дикторов по голосу применяется метод сравнения скользящих спектрограмм речи по различным критериям [6, 7]. Прямое сравнение скользящих спектрограмм затруднено из-за необходимости нормировки сигналов по длительности и интенсивности [8]. Нормировки по длительности можно избежать путем сравнения речевых сигналов за достаточно малые промежутки времени, что достигается за счет представления спектрограмм в матричной форме. Сравнимые скользящие спектрограммы (мгновенные спектры) тождественных по смыслу отрезков речевых сигналов  $f(t)$  и  $g(t)$ , произнесенных разными дикторами, имеют вид

$$F(\nu, t_1) = \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) e^{-i2\pi\nu t} dt, \quad (3)$$

$$G(\nu, t_2) = \int_{t_2}^{t_2+T} g(t) e^{-i2\pi\nu t} dt.$$

Хотя переменные  $\nu$ ,  $t$  по своему физическому смыслу являются непрерывными, по способу получения спектра и его регистрации они квантованы, поэтому функции  $F(\nu, t_1)$ ,  $G(\nu, t_2)$  можно считать матрицами, в которых строки и столбцы соответствуют частоте и времени. Корреляционная матрица скользящих спектрограмм с усреднением по частоте запишется следующим образом:

$$B(t_1, t_2) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} F(\nu, t_1) G(\nu, t_2) d\nu \left[ \int_{\nu_1}^{\nu_2} F^2(\nu, t_1) G^2(\nu, t_2) d\nu \right]^{1/2}. \quad (4)$$

ты в спектре речевых сигналов. Когда связь временных координат  $t_1$ ,  $t_2$  линейная, т. е.  $t_1 = kt_2$ , корреляционные максимумы матрицы  $B(t_1, t_2)$  будут лежать на диагонали. Если коэффициент  $k$  — функция времени, то корреляционные максимумы образуют линию  $t_1 = k(t_2)t_2$ , сохраняющую свойство непрерывности при непрерывном речевом сигнале. При несовпадении временных масштабов тождественных по смыслу отрезков речевого сигнала местом расположения корреляционных максимумов является линия, близкая к диагонали матрицы.

Скользящие спектрограммы тождественных по смыслу отрезков речевого сигнала, произнесенных разными дикторами, показаны на рис. 2, *a*, *б*. Спектрограммы получены на аналоговых оптических анализаторах, работающих в некогерентном свете [9]. Визуальное сравнение рис. 2, *a* и *б* показывает, что спектрограммы «похожи» в общих чертах, однако ясно видно различие в длительности и тонкой структуре отдельных фонов. Корреляционные матрицы были получены с помощью устройства, оптическая схема которого изображена на рис. 1. Быстрое движение транспаранта с записью одной из матриц совершалось за 1 с, медленное движение другого транспаранта — в течение 5 мин. Регистрация элементов корреляционной матрицы осуществлялась на фотопленку тем же способом, что и скользящих спектрограмм [9]: электрический сигнал преобразовывался в световой с помощью газосветной лампы, которая перемещалась относительно фотопленки в двух взаимно-перпендикулярных направлениях синхронно с движением транспарантов.

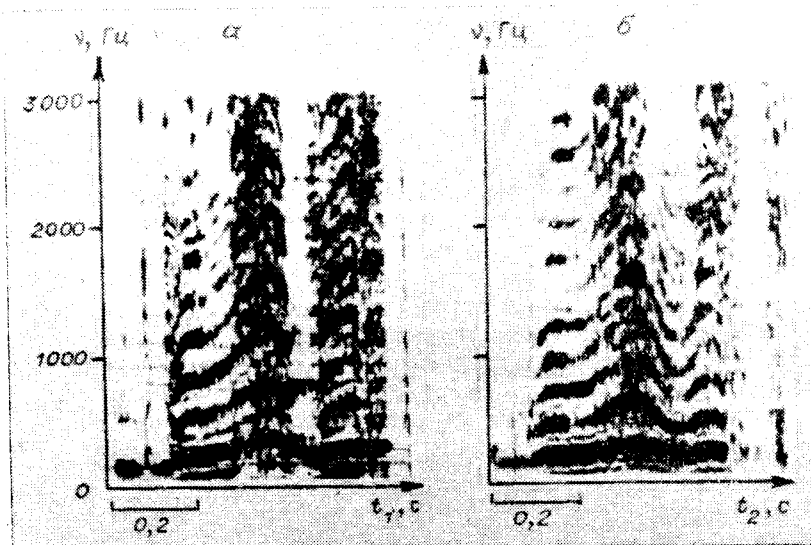


Рис. 2.



Рис. 3.

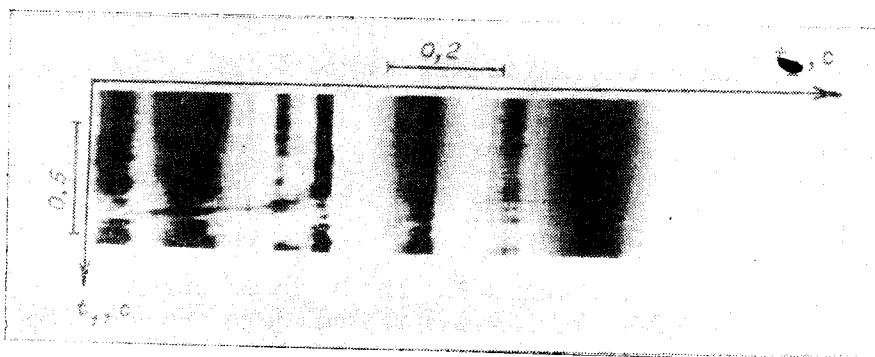


Рис. 4.

На рис. 3 приведена автокорреляционная матрица спектрограммы, показанной на рис. 2, а. Она имеет ярко выраженную диагональ, что означает тождественность коррелируемых сигналов. Корреляционная матрица скользящих спектрограмм представлена на рис. 4. Наблюдается частичная корреляция спектрограмм (отрезок линии вблизи диагонали), означающая совпадение спектрограмм на небольших временных интервалах. Корреляционные функции рис. 3, 4 показывают возможность идентификации дикторов по голосу и выделения одинаковых фонем и их сочетаний в исследуемых речевых сигналах путем применения метода умножения матриц. Эксперименты иллюстрируют возможность использования предложенного метода умножения матриц для сравнения сигналов, записанных в матричной форме.

В заключение отметим ряд достоинств и недостатков предложенного метода умножения матриц. Описанный метод отличается простотой оптической схемы и составляющих ее элементов; порядок перемножаемых матриц может быть достаточно большим и ограничивается только способом регистрации матричных элементов. К достоинствам метода следует отнести также получение результата умножения матриц в виде электрического сигнала и одновременно с производимыми вычислениями; это избавляет от дополнительных затрат времени на считывание результата и позволяет осуществить непосредственный ввод полученной информации в ЭВМ. Недостатками метода являются наличие механических перемещений, продолжительность операции перемножения, а также необходимость фотообработки при записи результата на фотошленку.

Автор выражает благодарность Е. Ф. Орлову за постановку задачи и полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Heinz R. A., Artman I. O., Lee S. M. Matrix Multiplication by Optical Methods.— Appl. Opt., 1970, N 9.
2. Jablonowski D. P., Heinz R. A., Artman I. O. Matrix Multiplication by Optical Methods. Experimental Verification.— Appl. Opt., 1972, vol. 11, N 1.
3. Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е. Умножение матриц оптическим методом.— Автометрия, 1972, № 6.
4. Кривенков Б. З., Михляев С. В., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований.— Автометрия, 1975, № 3.
5. Иванова Г. К., Новохацкая М. В., Орлов Е. Ф., Ольхов М. В. Исследование корреляционной матрицы скользящих спектрограмм речевого сигнала.— Труды АРСО-УИ, Новосибирск, 1973.
6. Рамшвили Г. С. Опыт автоматического узнавания личности говорящего.— В кн.: Сообщения АН Грузинской ССР. Тбилиси: Мецниереба, 1964, XXXVI, № 2, с. 279.
7. Bricker P. D. et al. Statistical Techniques for Talker Identification.— Bell System Techn. J., 1971, vol. 50, N 4, p. 1427.
8. Вентцель Е. С. Элементы динамического программирования.— М.: Наука, 1964.
9. Зверев В. А., Орлов Е. Ф. Оптические анализаторы.— М.: Сов. радио, 1971.

*Поступила в редакцию 30 ноября 1980 г.;  
окончательный вариант — 11 декабря 1982 г.*

УДК 535.44 : 215.6

Н. Д. ХАТЬКОВ, С. М. ШАНДАРОВ

(Томск)

### АНИЗОТРОПИЯ ЗАПИСИ ШУМОВЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$

В настоящее время основным механизмом фоторефракции в кристаллах  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  считается наведение стационарного электрического поля, вследствие фотовольтаического эффекта [1—3]. Фотовольтаический ток возникает при освещении кристалла, а его связь с полем световой волны задается фотовольтаическим тензором третьего ранга [2]. При неравномерной засветке кристалла, например, картиной интерференции двух световых волн носители заряда дрейфуют в освещенных областях и захватываются на ловушки в неосвещенных. Образующееся при этом распределение стационарного электрического поля играет роль голограммы и может сохраняться длительное время.

Обычно в кристаллах  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  исследуется запись голограмм, у которых составляющие пространственного спектра образуют малые углы с полярной осью Z [1]. В то же время симметрия кристалла разрешает протекание фотовольтаического тока, ответственного за запись, и в других направлениях [2, 3]. Анизотропия фоторефрактивного эффекта может проявляться, например, при формировании шумовых голограмм [4, 5]. Эти голограммы записываются в кристалле, по-видимому, из-за интерференции опорной волны с волнами, рассеянными в большом телесном угле на оптических неоднородностях.

Нами исследована анизотропия записи шумовых голограмм при распространении лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм вдоль кристаллофизической оси X кристалла  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  (0,02 вес. %). В направлении X длина l кристалла составляла 6 мм, коэффициент поглощения света  $\alpha$  равнялся  $6 \text{ м}^{-1}$ .

Скорость записи шумовой картины существенно зависела от интенсивности и поляризации света. Это иллюстрируется рис. 1, изображающим зависимости суммарной мощности  $\Delta P$  шумовых дифракционных максимумов от времени записи t. Величина  $\Delta P$  определялась по уменьшению мощности  $P_0$  прошедшего через кристалл опорного светового пучка в течение эксперимента ( $\Delta P(t) = P_0(0) - P_0(t)$ ). При этом предпо-