

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ И ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕЙЕРНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОРРЕЛЯТОРА

В последнее время получили развитие оптико-электронные сигнальные процессоры (ОЭСП), использующие конвейерный механизм обработки информации. Выбор оптимальных параметров процессора возможен путем исследования экспериментального макета устройства. Однако преодоление трудностей, связанных с ограниченной возможностью изменения параметров, неточностью их измерения и т. д., требует больших временных затрат и усилий.

Другой путь — моделирование на ЭВМ, позволяющее варьировать параметры математической модели в широких пределах. Такое моделирование помогает выбрать параметры блоков ОЭСП в соответствии с техническими требованиями к нему, а также оценить характеристики устройства с учетом предельно допустимых параметров его отдельных элементов. Одним из недостатков такого метода является сложность сопоставления результатов, полученных в реальном процессоре и в его модели.

Особенность данной работы состоит в том, что разработанный экспериментальный стенд включает в себя как макет ОЭСП, так и его программную модель, причем обеспечена стыковка макета и модели по входным и выходным данным, что позволило сравнить результаты их совместного функционирования. Исследования сигнального процессора проводились на примере задачи корреляционного распознавания изображений [4].

На рис. 1 приведена блок-схема экспериментального стенда. Стенд состоит из макета конвейерного оптико-электронного коррелятора [2], тест-контроллера и ЭВМ «Электроника 60». Коррелятор обеспечивает вычисление двумерной взаимно корреляционной функции входного изображения и эталонов. Алгоритм вычислений и его функциональная схема представлены на рис. 2, а, б соответственно. Функциональная схема включает в себя матрицу (линейку) светодиодов (СДМ), транспарант с эталонами (ТЭ), проектирующую оптику, блок зеркальной

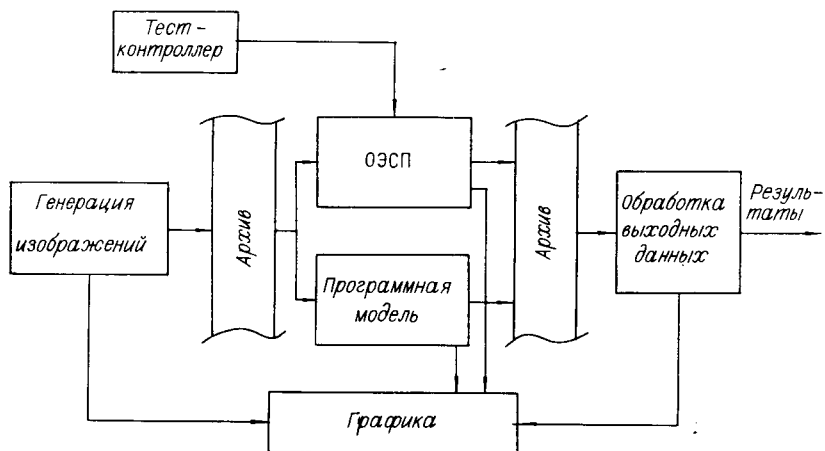


Рис. 1

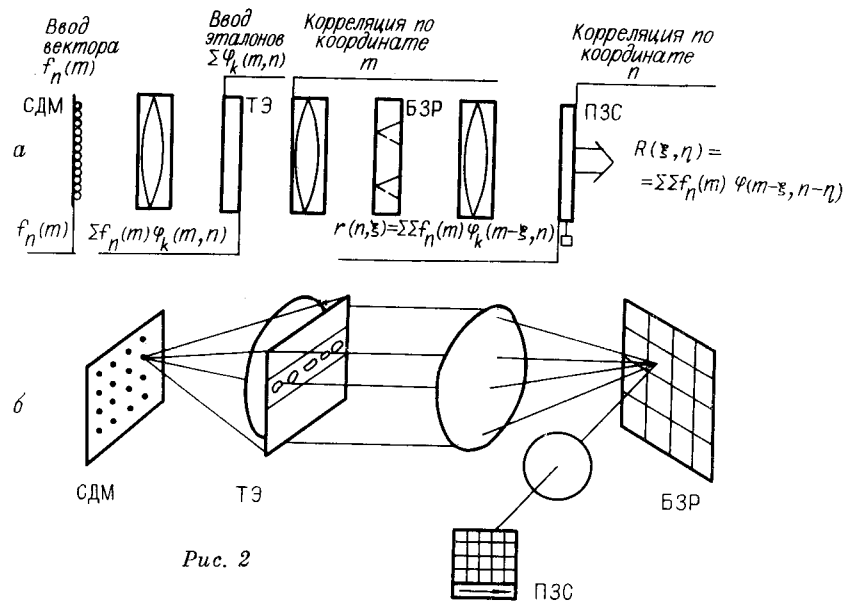


Рис. 2

разводки (БЗР) и ПЗС-матрицу, работающую в режиме временной задержки с накоплением.

Коррелятор работает следующим образом. Входное изображение высвечивается на светоизлучателях СДМ в виде векторов, пропорциональных строке изображения. Световые потоки светодиодов коллимируются и освещают весь транспарант с эталонами. Прошедшие через эталон пучки от светодиодов собираются каждый на своем зеркале, после чего изображение эталонов проецируется в плоскость ПЗС-матрицы. Зеркала развернуты так, что изображения эталонов, создаваемые различными светодиодами, смещены друг относительно друга по одной координате. Наложение изображений от различных светодиодов и создает одномерную вычисленную оптическим путем корреляционную функцию двумерных эталонов и одномерной входной строки, задаваемой на светодиодах. В ПЗС формируется двумерный зарядовый рельеф, пропорциональный световому распределению. В момент, когда подается следующий входной вектор, зарядовый пакет сдвигается на одну позицию по второй координате и происходит его суммирование с вновь образованным зарядовым рельефом. Цикл повторяется необходимое число раз, тем самым вычисляется двумерная функция корреляции эталонов и входного изображения.

Тест-контроллер — это комплекс, позволяющий производить испытание процессора на тестах, синтезированных с помощью ЭВМ. Тесты могут быть как простыми, так и сложными. Простые тесты, например в виде отдельно светящихся излучателей, необходимы для настройки коррелятора, сложные — представляют собой зашумленные изображения.

На ЭВМ «Электроника 60» реализована математическая модель ОЭСП. Программный модуль моделирует работу экспериментального макета как с учетом, так и без учета помех, возникающих в различных блоках коррелятора; имеется возможность интерактивного изменения параметров. Блок-схема модели совпадает по своей структуре с функциональной схемой коррелятора (см. рис. 2), и ее отдельные блоки предназначены для выполнения соответствующих функций. Синтезирование помех проводится специальной процедурой «Датчик случайных чисел», при обращении к которой генерируются случайные числа с нулевым средним значением и единичной дисперсией. Один цикл работы модели можно разбить на несколько этапов: ввод параметров, чтение

данных, вычисление корреляционной функции, запись выходных данных. Для учета всех параметров и повышения быстродействия база данных модели реализована в виде списочной структуры. Для контроля и отображения полученных результатов любые данные могут быть выведены на экран цветного монитора.

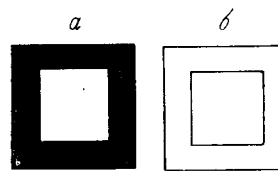


Рис. 3

Другая функция ЭВМ — обеспечение экспериментального стеда программной поддержкой. ЭВМ служит для управления всеми компонентами системы, для взаимодействия с оператором, обеспечивает ввод-вывод данных и их обработку. Все математическое обеспечение системы написано на языке высокого уровня Паскаль и работает в среде операционной системы RT-11. В его структуру, кроме модулей управления макетом и моделью, входят также модули генерации распознаваемых изображений и эталонов, предобработки входных изображений (оконтуривание и бинаризация), сравнения макетных и модельных выходных данных, статистической обработки результатов, графики и тестов.

В качестве распознаваемого тестового изображения выбран объект, показанный на рис. 3, а. На этом рисунке эталон представляет собой идеальный контур данного объекта, входными сигналами являются оконтуренные изображения при различных уровнях шума (рис. 3, б).

В работе проведено сравнение вычисленных макетом ОЭСИ и его моделью корреляционных функций при различных уровнях шума во входном изображении, рассмотрено влияние аддитивных и мультипликативных помех на вероятность пропуска цели, оценено влияние погрешностей ПЭС-матрицы (фотонный шум, неравномерность чувствительности, неоднородность темнового тока, неэффективность переноса, шум выходного каскада) на выходную корреляционную функцию*.

Входные изображения для экспериментальных исследований, синтезированные с помощью специального программного модуля, подавались одновременно на вход как макета, так и модели. Вычисленные корреляционные функции записывались в архив для их последующей обработки. Все приведенные ниже результаты получены на основе статистической обработки 25 независимых реализаций наблюдений для каждого значения исследуемого параметра.

При сравнении корреляционных функций, вычисленных на макете конвейерного коррелятора и его модели, использовался широко распространенный метод линейной регрессии, описанный, например, в [3]. Его применение гарантирует инвариантность вычислений к оптическим преобразованиям [1], а также к масштабу и линейному переносу. Так, согласно этому методу, если f и φ — соответственно функции, полученные на макете и модели, то f преобразуется к φ с помощью соотношений:

$$f'_i = Af_i + B, \quad i = 1, \dots, N;$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f}) \varphi_i}{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}, \quad B = \bar{\varphi} - A\bar{f},$$

где f' — приведенная макетная функция; \bar{f} и $\bar{\varphi}$ — средние значения функций по i ; N — количество отсчетов функций.

Для непосредственного сравнения функции f и φ были представлены в виде N -мерных векторов и вычислялась некоторая общая мера

* Используемые в работе термины «вероятность пропуска цели» и «вероятность ложной тревоги» соответствуют понятиям, принятым в литературе по теории распознавания (см., например, [1]).

расстояния между ними, определенная как

$$\Delta = \sqrt{\sum_i (\varphi_i - f'_i)^2 / \sum_i \varphi_i^2}. \quad (1)$$

Очевидно, что в случае полного совпадения двух функций Δ тождественно равна нулю.

Для получения оценочных результатов в смысле распознавания объектов использовалось решающее правило, которое выглядит следующим образом: объект f относится к классу k , если

$$\frac{f \otimes \varphi_k}{\|f\| \|\varphi_k\|} \geq H_1,$$

где $\|f\|$ и $\|\varphi_k\|$ — соответственно нормы распознаваемого изображения и эталона; H_1 — порог, определяемый вероятностью ложной тревоги. С целью исключения операции деления решающее правило было модифицировано следующим образом: объект f относится к классу k , если

$$f \otimes \varphi \geq \max \{H_2; H_1 \|f\| \|\varphi_k\|\}, \quad (2)$$

здесь H_2 — абсолютный порог, определяемый уровнем шума корреляционной функции. Норма входного изображения задается путем корреляции входного сигнала с нормировочным окном. Вычисленная таким образом норма характеризует интенсивность входного изображения. Норма эталона пропорциональна интегральному пропусканию его маски и для заданного эталона является постоянной.

На рис. 4 представлены результаты сравнения корреляционных функций, вычисленных на макете и модели. На графике видна функциональная зависимость выбранной нами меры расстояния от дисперсии шума во входном изображении. Вертикальные отрезки на кривых обозначают доверительный интервал для среднеквадратичного отклонения каждого отдельного измерения. Рассматривалось влияние аддитивных (а) и мультипликативных (б) помех. На рис. 4 видно, что в обоих случаях наблюдается примерно одинаковый характер поведения кривых. Максимальное расстояние между двумя корреляционными функциями (0.23) достигается при идеальном входном сигнале. С ростом дисперсии (приблизительно до уровня 60 % от амплитуды идеального сигнала) это расстояние уменьшается и затем практически не изменяется. Такой характер зависимости можно объяснить следующим образом. При малом уровне шума на входе устройства основной вклад в отличие двух корреляционных функций дают внутренние помехи экспериментального макета. С возрастанием входного шума возрастает и его вклад в общую сумму помех. В связи с тем, что на вход модели и макета подается один и тот же строго детерминированный сигнал, представляющий собой конкретное изображение с конкретной реализацией шума, то расстояние на выходе между обработанными сигналами уменьшается вследствие уменьшения относительного влияния внутренних помех на корреляционную функцию. Другими словами, это можно выразить так: чем сложнее изображение на входе экспериментального макета, тем меньше обусловленное его внутренними шумами искажение корреляционной функции.

На рис. 5 приведены полученные на модели данные, отражающие функциональную зависимость точности вычисления корреляционной функции от уровня помех в блоке ПЗС. Цифрами обозначены графики: 1 — для неоднородности темнового тока δ (среднее значение темнового тока A составляет $\sim 0,4$ % от максимального зарядового макета, величина которого $\sim 2 \cdot 10^5$ электронов); 2 — для шума выходного каскада σ (в электронах); 3 — для фотонного шума σ ; 4 — для неравномерности чувствительности (в процентах); 5 — для неэффективности переноса s . Под точностью η подразумевается величина, равная $1 - \Delta$, где Δ определяется по формуле (1). В данном случае φ — функция, полученная

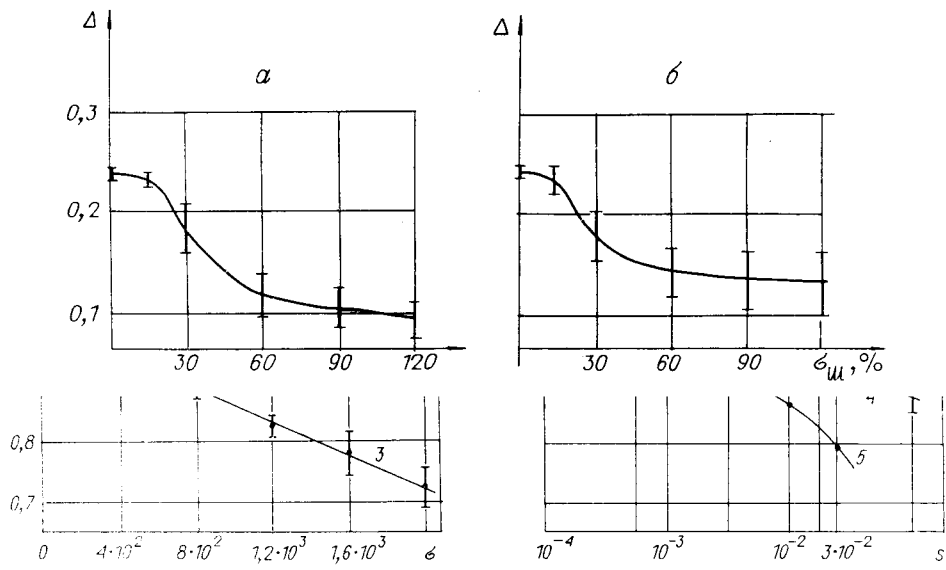


Рис. 5

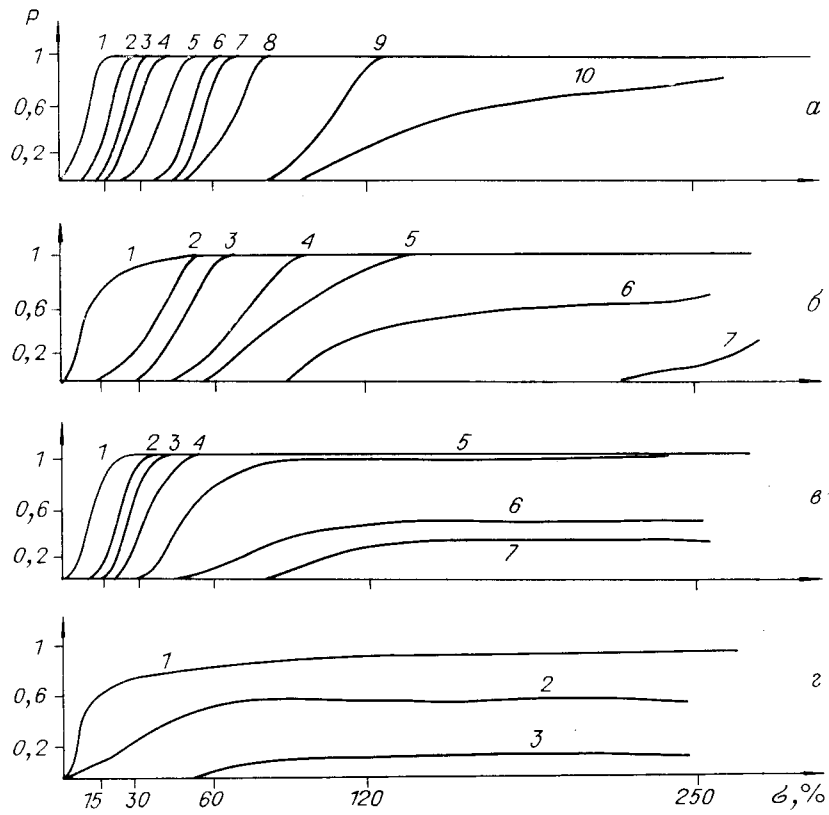


Рис. 6

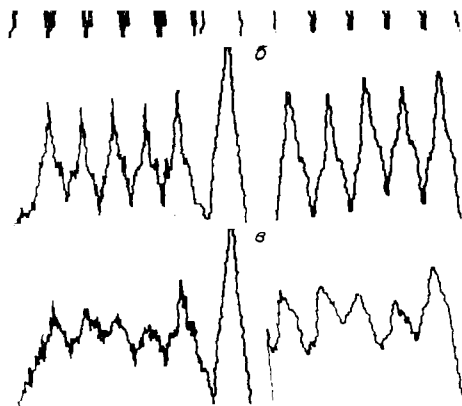


Рис. 7

центр пика смещался на несколько элементов разрешения по обеим координатам. Однако в связи с тем, что в настоящее время величина неэффективности в современных приборах достигает значений 10^{-4} и даже 10^{-5} , этот эффект практически незначителен. Его влияние может сказаться при большом, порядка 10^3 , числе переносов заряда.

Оценочные результаты по распознаванию объектов представлены на рис. 6 (*а, в* — для модели, *б, г* — для макета). Цифрами обозначены графики, построенные для различных порогов H_1 из решающего правила (2). Графики под номером 1 соответствуют порогу, при котором вероятность ложной тревоги равна нулю, последующие графики (2–10) построены для более высоких уровней вероятности.

На рисунке видно, что при мультипликативном шуме во входном сигнале (см. рис. 6, *в, г*) для установленного уровня ложной тревоги наблюдается инвариантность вероятности пропуска цели к росту дисперсии шума. При аддитивном шуме (см. рис. 6, *а, б*) увеличение его дисперсии приводит к более быстрому росту нормы входного изображения. Таким образом, описанное решающее правило и выбранный нами способ нормировки более приемлемы для случая мультипликативного шума.

Проведенные на примере задачи корреляционного распознавания изображений совместные исследования макета ОЭСИ и его программной модели показали, что:

с ростом дисперсии шума во входном сигнале уменьшается определенная нами мера расстояния между корреляционными функциями, вычисленными макетом и моделью;

из рассмотренных параметров в блоке ПЗС наибольший вклад в неточность вычислений вносят фотонный шум и неэффективность переноса;

при выбранных нами способе нормировки входного изображения и решающем правиле распознавания мультипликативный шум оказывает меньшее влияние на качество распознавания, чем аддитивный;

математическая модель ОЭСИ с хорошей точностью имитирует работу экспериментального макета.

На рис. 7 представлены примеры вычисленных макетом (справа) и моделью (слева) корреляционных функций для некоторых уровней шума, где *а* — входной сигнал без шума, *б, в* — аддитивный шум 60 и 120 % соответственно.

реальных приборов (данные по некоторым отечественным и зарубежным ПЗС приведены в [4, 5]).

На рис. 5 видно, что основной вклад в неточность вычислений в блоке ПЗС вносят фотонный шум и неэффективность переноса. Кроме того, при значениях неэффективности $\sim 10^{-1}$ и выше наблюдалось смещение корреляционного пика и «расплывание» зарядового пакета. Это известный факт, описанный во многих работах (например, [6, 7]). Смещение пика приводит к ошибкам в определении координат распознаваемого объекта. В данной модели

В заключение авторы выражают свою признательность Е. С. Пежевенко за участие в постановке задачи и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалевский В. А. Методы оптимальных решений в распознавании изображений.— М.: Наука, 1976.
2. Гофман М. А., Пежевенко Е. С. Конвейерные оптико-электронные процессоры // Тез. докл. на 5 Всесоюз. конф. по оптической обработке информации.— Киев: КПИ, 1984.
3. Браунли К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике.— М.: Наука, 1977.
4. Janesick J. R., Elliot T., Collins S. Scientific charge-coupled device // Opt. Eng.— 1987.— P. 692.
5. Алексеенко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения.— М.: Радио и связь, 1987.
6. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда.— М.: Мир, 1978.
7. Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана.— М.: Энергоиздат, 1981.

Поступила в редакцию 9 декабря 1988 г.
