

Даны рекомендации о соотношении между предельной погрешностью расшифровки, шагом дискретизации и числом градаций яркости в цифровом образе интерферограммы (3).

Описан использованный программно-аппаратный комплекс голографической измерительной системы, реализующий расшифровку интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов.

Выделены основные этапы преобразований оптической информации, а также наиболее перспективные последовательности этих преобразований (5) — (8).

Примеры расшифровки (см. рис. 3—6), осуществленной по разным последовательностям, подтверждают высокую производительность и точность разработанных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанов А. Н., Де С. Т., Ильиных С. П., Хандогин В. А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. I: Анализ и алгоритмы // Автометрия.— 1989.— № 1.
2. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 28 сентября 1987 г.

УДК 621.372.8

**А. В. ЛОГИНОВ, М. Я. МЕШ, И. М. ОВЧИННИКОВ,
А. Л. ШЛИФЕР, Г. А. ЮДИН**
(Новосибирск — Ташкент)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Решение задачи определения координат движущегося объекта имеет большое практическое значение для различных областей науки и техники: экспериментальной механики, биомедицинских и метеорологических исследований, промышленной роботизации, автоматизации производства и т. д.

Большинство известных в настоящее время алгоритмов решения задачи слежения основаны на программной реализации [1—3]. В данной работе приводится описание гибридного специализированного вычислителя для слежения за поступательным движением двумерного объекта на основе волоконно-оптической линии задержки.

Для решения задачи слежения был разработан алгоритм, в основе которого лежат две операции — задержка сигнала и определение совпадения двух сигналов (логическое И). Отметим, что вторая операция достаточно просто и быстро реализуется с помощью электроники. Задержка же сигнала, особенно высокочастотного, на большие временные интервалы является весьма сложной задачей для традиционной электроники, но легко осуществима в волоконно-оптических линиях задержки [4].

Суть предложенного алгоритма состоит в том, что из поступающего в виде бинарной последовательности импульсов первого кадра формируется девять кадров-эталонов, соответствующих элементарному поступательному смещению изображения объекта в плоскости кадра по вертикали (два эталона), горизонтали (два эталона), диагонали (четыре эталона) и отсутствию смещения (один эталон). С каждым из девяти

эталон сравняется второй кадр. По результату этого сравнения находится эталон, максимально совпавший со вторым кадром и соответствующий осуществленному перемещению объекта. Одновременно из второго кадра формируется девять кадров-эталонов для сравнения со следующим, третьим кадром и т. д.

Обозначим через

$$A = f(x, y, t_1) \text{ и } B = f(x, y, t_2), \quad 1 \leq x \leq N; \quad 1 \leq y \leq M, \quad (1)$$

кадры с движущимся объектом, полученные соответственно в моменты времени t_1 и t_2 , причем $t_2 = t_1 + T_k$, где T_k — период следования кадров.

Осуществление построчной развертки преобразует эти кадры к виду

$$A = f'(z, t_1), \quad B = f'(z, t_2), \quad 1 \leq z \leq MN. \quad (2)$$

Образование девяти кадров-эталонов означает, что из кадра формируется девять кадров A'_i :

$$A'_i = f(z - S_i, t_1), \quad (3)$$

где S_i — возможное перемещение объекта в кадре B относительно объекта в кадре A . При этом для горизонтальных смещений $S_{1,2} = \pm 1$, для вертикальных — $S_{3,4} = \pm N$, для диагональных — $S_{5-8} = \pm 1 \pm N$, для отсутствия смещения $S_5 = 0$.

Далее для каждого i производится операция

$$P_i = \sum_{z=1}^{MN} A'_i(z - S_i, t_1) B(z, t_2) \quad (4)$$

и определяется максимальное значение P_i :

$$i_n = i[\max(P_i)]. \quad (5)$$

Полученная величина i_n однозначно соответствует истинному смещению объекта S_i .

Таким образом, в данном алгоритме реализуются следующие операции:

- а) предсказание возможных смещений (формула (3));
- б) параллельное определение девяти функций взаимной корреляции (формула (4));
- в) определение по максимальному значению корреляционных функций истинного (из девяти предсказанных) смещения.

Следует отметить, что вместо кадров можно сравнивать одинаковые фрагменты, содержащие изображения объекта, а также один или несколько одинаковых (выбранных по одному и тому же условию) элементов изображения. Уменьшение потока информации в этом случае может привести к снижению точности определения смещения, однако, во-первых, оно допустимо при малом уровне шумов, во-вторых, не меняет принципа работы устройства (и сущности алгоритма).

Из вышеизложенного следует, что данный алгоритм предполагает, что смещение объекта за кадр не превосходит одного элемента изображения. Это требование корректно в случае большой скорости следования кадров (более 10^4 кадр./с). Период следования кадров в этом случае меньше 100 мкс, а перемещение изображения более чем на один элемент может (при соответствующем выборе оптики, формирующей изображение) достигаться лишь на предельных для материального объекта скоростях ($\sim 10^4$ м/с). Напротив, для реализуемых на практике скоростей движущихся объектов при указанной скорости поступления кадров смещение на один элемент произойдет лишь за несколько кадров.

В связи с тем, что предлагаемый алгоритм ранее не применялся, возникла необходимость проверки его работоспособности на предмет таких критериев, как устойчивость к шумам и стабильность определения перемещения объектов произвольной формы. Проверка работоспособности предложенного алгоритма и его сравнение с известным алгорит-

Шум, %	Объект							
	16×16		13×13		10×10		7×7	
	Достоверность, %							
	Алгоритм Мерфи	Предложенный алгоритм	Алгоритм Мерфи	Предложенный алгоритм	Алгоритм Мерфи	Предложенный алгоритм	Алгоритм Мерфи	Предложенный алгоритм
40	25	60	45	65	50	40	60	30
30	30	80	45	70	60	60	65	45
20	55	90	65	90	65	85	65	65
15	65	100	75	100	65	100	80	90
10	90	100	80	100	95	100	85	95
5			95	100			95	100

мом Мерфи [1] проводились методом численного моделирования. Разработанная программа позволяла исследовать поведение сравниваемых алгоритмов для девяти одинаковых перемещений (вверх — вниз, влево — вправо, диагональные и нулевые смещения) объекта произвольно задаваемой формы в кадре размерами 32×32 элемента. Шум в кадре задавался генератором случайных чисел для каждого испытания и мог варьироваться в диапазоне 0—100 %. Программа могла набирать статистику по заданному количеству попыток распознавания направления вектора перемещения при заданном уровне шума и геометрии объекта. В результате выдавалась распечатка гистограмм, на основании которых можно было сделать вывод о статистике распределения ошибок в распознавании единичного перемещения объекта в зависимости от типа используемого алгоритма.

В таблице представлены результаты моделирования (25 попыток на каждый алгоритм и каждое направление единичного перемещения), полученные с помощью разработанной программы (объект-квадрат) при уровнях шума в кадре от 5 до 40 %. Сравнение предложенного нами алгоритма с алгоритмом Мерфи показывает, что при зашумленности кадра до 10 % оба алгоритма позволяют практически безошибочно определять смещение объекта. При дальнейшем росте зашумленности (до 15 %) появляются сбои в программе, реализующей алгоритм Мерфи. И только при достаточно большом уровне шума (~20 %) возникали сбои в работе предложенного алгоритма.

Результаты численного моделирования позволяют говорить о том, что предложенный алгоритм не уступает известным по таким критериям, как устойчивость его работы к шуму и изменению геометрии объекта. С другой стороны, как будет показано ниже, его аппаратная реализация давала возможность уменьшить время обработки поступающей информации на несколько порядков.

Аппаратно предложенный алгоритм реализуется следующим образом. Предположим, что кадр размером $M \times N$ поступает в виде последовательности импульсов построчной развертки. Период следования импульсов (элементов кадра) обозначим $T_{эл}$, а период следования кадров — T_k . Тогда кадр A , задержанный на время

$$T_1 = T_k, \quad (6)$$

является для кадра B эталоном A'_1 , соответствующим отсутствию смещения. Та же информация, задержанная на время

$$T_{2, (3)} = T_k + (-)T_{эл}, \quad (7)$$

является эталоном $A'_2 (A'_3)$, соответствующим смещению влево (вправо) на интервал

$$T_{4, (5)} = T_k + (-)NT_{эл} \quad (8)$$

вниз (вверх).

Для получения четырех диагональных смещений необходимы задержки на времена

$$T_{6-9} = T_k \pm (N \mp 1)T_{эл}. \quad (9)$$

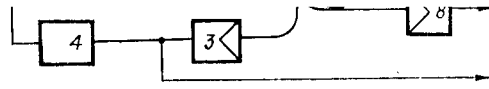


Рис. 1

Отметим теперь, что в существующих системах телевизионной развертки и твердотельных фотодиодных матрицах время T_k лежит в диапазоне 10^{-4} — 10^{-2} с, время $T_{эл}$ (соответствующее скорости считывания) может составлять $3 \cdot 10^{-8}$ — 10^{-6} с, наконец, длительность импульса, соответствующая времени $T_{эл}$, приводит к частотному спектру сигнала в полосе 10^7 — 10^9 Гц.

Следовательно, для реализации указанных задержек необходимо, чтобы линии задержки имели произведение полосы пропускания на время задержки, равное 10^5 , а точность выставления времени задержки — 10^{-5} . Из известных в настоящее время линий задержки только волоконно-оптические [4, 5] могут удовлетворять указанным требованиям, причем использование в этих линиях ответвителей оптического сигнала и многократной рециркуляции сигнала [6] позволяет реализовать все девять требуемых задержек с помощью одного волоконно-оптического тракта (и одного источника оптического сигнала).

Один из вариантов такого волоконно-оптического тракта, блок-схема которого представлена на рис. 1, был реализован в макете специализированного вычислителя. Последовательность N импульсов (одна строка кадра, первый элемент которой был первым элементом, принадлежащим изображению объекта в кадре) поступала на полупроводниковый лазер 1, в оптическом виде проходила волоконный световод 2, задерживалась в нем на время

$$T_0 = NT_{эл} \quad (10)$$

и принималась фотоприемником 3. Далее в регенераторе 4 восстанавливались характеристики (амплитуда и крутизна фронтов) электрических импульсов, и сигнал вновь подавался на лазер 1. Если

$$T_k = KNT_{эл}, \quad (11)$$

где K — целое число, то после K проходов (рециркуляций) по волоконному световоду время задержки удовлетворяло формуле (6), а после $K + (-)1$ проходов — формуле (8). Два волоконных ответвителя 5 и 6 имели такую длину, что сигналы на выходах сопряженных с ними фотоприемников 7 и 8 после K рециркуляций были задержаны на времена T_2 и T_3 (в соответствии с формулой (7)), а времена их задержки после $K + (-)1$ рециркуляций соответствовали временам T_6 — T_9 (формула (9)). Для реализации этих задержек использовался многомодовый световод со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевины ~ 50 мкм. Затухание световода составляло ~ 4 дБ/км. Волоконные ответвители изготавливались из того же световода с помощью сварки. Вносимое каждым ответвителем затухание не превышало ~ 10 дБ.

Таким образом, волоконно-оптическое устройство (см. рис. 1) представляет собой предсказатель всех возможных положений объекта в последующем кадре, в котором сигналы-предсказания вырабатываются параллельно и представляют собой построчную развертку изображения. Такие предсказания производятся за время T_k с помощью волоконно-оптических линий задержки.

Блок-схема всего устройства представлена на рис. 2. Приходящий сигнал проходит блок волоконно-оптических линий задержки 1 и одно-

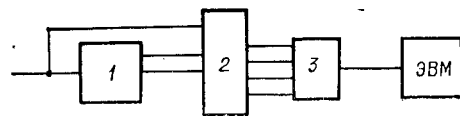


Рис. 2

временно с сигналом следующего кадра поступает в блок 2 логики, в котором производится определение чисел совпадений для каждого эталона (каждой задержки), т. е. параллельно вычисляется девять значений корреляционных функций и осуществляется выбор максимального из них. Выходной сигнал блока логики представляет собой число i ($i = 1-9$), поступающее в двоичном параллельном коде (четыре импульса) в интерфейсный блок 3, служащий для сопряжения устройства с ЭВМ, которая необходима лишь для регистрации и визуализации результата обработки.

В наших экспериментах время $T_{эл}$ составляло 30 нс, что определялось возможностями микросхем серии К531. Для приемника изображения из $N \times N$ элементов, как видно из формулы (7), минимальный период следования кадров может составлять $T_{к min} = N^2 T_{эл}$, что, например, волоконно-оптическим специализированным процессором, осуществляющим рекуррентную корреляционную цифровую обработку (вычисление смещения поступательно движущегося двумерного объекта) изображения с функциями предсказания. При этом способ обработки информации полностью динамический (отсутствие запоминающих устройств и операций обращения к памяти), что позволяет осуществлять слежение за объектом в реальном масштабе времени.

Таким образом, в данной работе показано следующее:

1) основой специализированного вычислителя является волоконно-оптическая рециркуляционная многоотводная линия задержки, так как именно она обеспечивает пространственно-временное совмещение (разделение) представленной в виде оптических импульсов информации и ее хранение в динамическом виде;

2) предложенный алгоритм рекуррентной корреляционной обработки с предсказанием для определения поступательного смещения объекта по устойчивости к шуму и изменению его геометрии сравним со своими аналогами;

3) аппаратная реализация этого алгоритма в волоконно-оптическом специализированном вычислителе позволила поднять быстродействие в 10^5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусман Х. Г., Пирш П., Граллерт Х-И. Достижения в области кодирования изображений // ТИИЭР.— 1985.— 73, № 4.
2. Аггарвал Д. К., Дейвис Л. С., Мартин У. Н. Методы установления соответствия при анализе динамических сцен // Там же.— 1981.— 69, № 5.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1981.
4. Jackson K. P., Newton S. A., Moslehi V. e. a. Optical fiber delay-line signal processing // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques.— 1983.— MTT-33, N 3.— P. 193.
5. Chang C. T., Lothringer J. W., Gennetten E. W., Dillerd G. M. Recirculation of ns pulses through a 5,5 km single-mode fiber optic delay line // 4 Int. Conf. Integral Opt. and Opt. Fiber. Commun, Tokyo, June 27—30, 1983; Main Conf. Techn. Dig.— Tokyo, 1983.
6. Гуляев Ю. В., Деметвиенко В. В., Львова М. В. и др. Волоконно-оптический элемент хранения информации // Письма в ЖТФ.— 1986.— 12, вып. 6.

Поступила в редакцию 17 сентября 1987 г.