

УДК 681.323 : 523.8

П. Г. Попов  
(Новосибирск)

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МЕРА БЛИЗОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ.  
Ч. II. КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПАМЯТЬ. СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ**

На основе динамической меры близости изображений вводится понятие кратковременной памяти в следящих системах и предлагаются методы построения систем контроля за срывом слежения, центрирования объектов и автофокусировки. Приведена структурная схема следящей системы, использующей предложенные методы.

В части I [1] были рассмотрены вопросы использования локальных анизотропных признаков (ЛАП) изображений для селекции динамических объектов в следящих системах с покадровой сменой эталона. Различные варианты межкадровой обработки изображений позволяют повысить устойчивость слежения, а также оценить форму движущегося объекта и его аффинные трансформации в плоскости изображения.

Дадим другое определение функции  $D$ :

$$D_k[\bar{i}; (k+1)T] = \begin{cases} D_k(\bar{i}; kT) + \tau_1, & \text{если } a(\bar{i}; kT) = a[\bar{i}; (k+1)T]; \\ D_k(\bar{i}; kT) - \tau_2, & \text{если } a(\bar{i}; kT) \neq a[\bar{i}; (k+1)T]; \\ D_k[\bar{i}; (k+1)T] > 1; \tau_1, \tau_2 > 0. \end{cases}$$

Начальные условия при этом остаются прежними.

В этом случае даже при полном заслонении объекта функция  $D_k$  некоторое время сохраняет информацию о нем, т. е. функция  $D_k$  обладает кратковременной памятью. Через некоторое количество кадров, определяемое величинами  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , информация об объекте стирается из кратковременной памяти, если объект снова не появится в поле зрения следящей системы.

На рис. 1 и 2 приведены результаты экспериментов, повторяющих эксперименты ч. I (рис. 5 и 6), где тестовое изображение зашумлялось и перемещалось по случайному фону, с той лишь разницей, что вместо матрицы сравнений (МС) использовалась матрица  $D_k$  (при  $\tau_1 = 1$  и  $\tau_2 = 1$ ). Черные элементы на этих рисунках соответствуют максимальным значениям матрицы  $D_k$ .

Из сравнения результатов видно, что матрица  $D_k$  гораздо лучше адаптируется к форме объекта, чем МС. Это связано с тем, что в МС накладываются лишком жесткие ограничения при несовпадении элементов эталонов (признаков элементов) — элементу МС присваивается единичное значение. Од воздействием шумов или при переходе от статики к динамике некоторые элементы МС резко «сбрасываются» в единичные значения, что может привести к дрожанию или дрейфу эталона. Отмена этого условия и замена его вычитанием параметра  $\tau_2$  позволяют исключить резкие случайные изменения  $D_k$  и динамической меры близости (ДМБ).

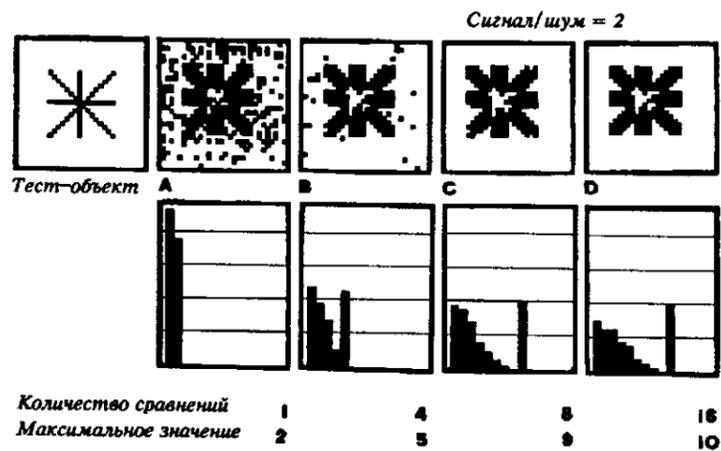


Рис. 1

Рассуждая аналогично тому, как это было сделано раньше для МС, можно оценить вероятности появления определенных значений элементов матрицы  $D_k$ . Расчетные значения вероятностей (%) появления значений элементов для  $p = 0,5$  и  $q = 0,5$  приведены в табл. 1 (для  $\tau_1 = 1$  и  $\tau_2 = 1$ ) и в табл. 2 (для  $\tau_1 = 1$  и  $\tau_2 = 2$ ). Для получения стабильных результатов необходимо иметь установившуюся матрицу  $D_k$  с соответствующим максимальным значением элементов  $x_m$ . Число кадров, в течение которых матрица сохраняет информацию об объекте, зависит от максимального значения  $x_m$ . В свою очередь, число  $x_m$  определяется количеством сравнений эталона, после которого получается установившаяся матрица. Таким образом, необходимо произвести взаимную увязку параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $x_m$ , исходя из требований, предъявляемых к системе слежения. Связь этих параметров легко просматривается из данных табл. 1 и 2.

Рассмотрим, как меняется максимальное значение  $x_m$  матрицы  $D_k$  при потере объекта. Значения вероятностей  $P$  изменения  $\Delta$  максимального значения легко вычисляются. В табл. 3 приведены аналитические выражения для этих вероятностей, а на рис. 3 — расчетные графики этих вероятностей для случая  $p = 0,25$ ,  $q = 0,75$ ,  $\tau_1 = 1$ ,  $\tau_2 = 1$ . Цифры на рисунке обозначают количество кадров, прошедшее после потери объекта.

Введение кратковременной памяти позволяет, кроме вышеупомянутых случаев, избежать срыва слежения при сильной засветке приемника излу-

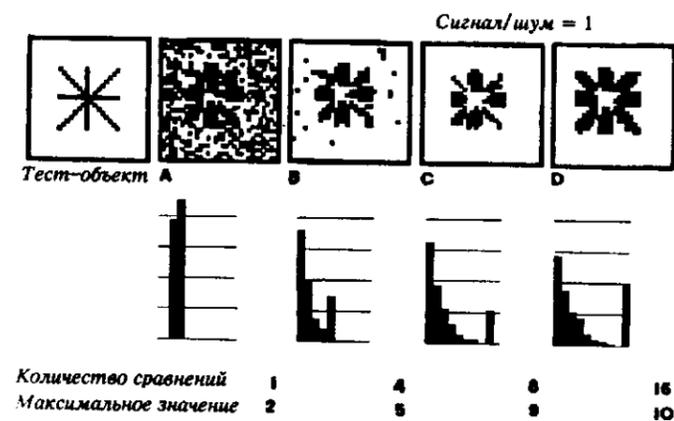


Рис. 2

Таблица 1

	Количество сравнений																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	50	50	37	37	31	31	27	27	25	25	23	23	21	21	20	20	19	19	18	18	17	17	16	16	15
2	50	25	37	25	31	23	27	22	25	21	23	19	21	18	20	17	19	17	18	16	17	15	16	15	15
3		25	12	25	16	23	16	22	16	21	16	19	16	18	15	17	15	17	14	16	14	15	14	15	13
4			12	6	16	9	16	11	16	12	16	12	16	12	15	12	15	12	14	12	14	12	14	12	13
5				6	3	9	5	11	7	12	8	12	9	12	9	12	9	12	10	12	10	12	10	12	10
6					3	2	5	3	7	4	8	5	9	6	9	7	9	7	10	7	10	8	10	8	10
7						2	1	3	2	4	3	5	3	6	4	7	5	7	5	7	6	8	6	8	6
8							1		2	1	3	2	3	2	4	3	5	3	5	4	6	4	6	4	6
9										1	1	2	1	2	1	3	2	3	2	4	3	4	3	4	3
10											1		1	1	1	1	2	1	2	1	3	2	3	2	3
11														1		1	1	1	1	1	1	2	1	2	1
12																	1		1		1	1	1	1	1
13																						1		1	1
14																									1

чения, которая вызывает послесвечение фоточувствительных материалов. Величина  $t_2$  при этом выбирается исходя из времени послесвечения.

Рассмотрим вопрос о других дополнительных возможностях, которые дает применение описанных методов при построении систем технического зрения (СТЗ).

Операция захвата объекта в СТЗ может производиться либо оператором, либо автоматически. И в том и в другом случае при захвате объекта часто возникают ошибки различного рода. Может оказаться, что в эталон попадает только часть объекта, как это показано на рис. 4, б. Может также оказаться, что объект полностью находится в эталонном изображении, но отсутствует на линии визирования (нуль относительных координат), как показано на

Таблица 2

	Количество сравнений																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	50	50	50	44	44	44	41	41	41	40	40	40	40	40	40	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
2	50	25	25	31	25	25	27	25	25	26	24	24	25	24	24	25	24	24	24	24	24	24	24	24	24
3		25	12	12	19	14	14	17	14	14	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
4			12	6	6	11	8	8	10	8	8	10	9	9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
5				6	3	3	6	4	4	6	5	5	6	5	5	6	5	5	6	5	5	6	5	5	6
6					3	2	2	4	2	2	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	3	3	3
7						2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8							1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9											1		1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 3

	Количество сравнений						
	0	1	2	3	4	5	6
...	...	...	...	...	...	...	...
6	0	0	0	0	0	0	$p^6$ ...
5	0	0	0	0	0	$p^5$	0 ...
4	0	0	0	0	$p^4$	0	$6p^5q$ ...
3	0	0	0	$p^3$	0	$5p^4q$	0 ...
2	0	0	$p^2$	0	$4p^3q$	0	$15p^4q^2$ ...
1	0	$p$	0	$3p^2q$	0	$10p^3q^2$	0 ...
0	1	0	$2pq$	0	$6p^2q^2$	0	$20p^3q^3$ ...
-1	0	$q$	0	$3pq^2$	0	$10p^2q^3$	0 ...
-2	0	0	$q^2$	0	$4pq^3$	0	$15p^2q^4$ ...
-3	0	0	0	$q^3$	0	$5pq^4$	0 ...
-4	0	0	0	0	$q^4$	0	$6pq^5$ ...
-5	0	0	0	0	0	$q^5$	0 ...
-6	0	0	0	0	0	0	$q^6$ ...
...	...	...	...	...	...	...	...

рис. 4, а. В любом случае в СТЗ будут определяться не истинные координаты объекта.

Задача центрирования объекта сводится к совмещению геометрического центра изображения объекта с центром эталона.

Определим координаты  $x_0$  и  $y_0$  геометрического центра бинарного изображения как

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b(x_i, y_j) x_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b(x_i, y_j)}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b(x_i, y_j) y_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b(x_i, y_j)}$$

где  $n \times n$  — размер эталона,  $b(x, y)$  — яркость изображения в точке  $(x, y)$ .

Скомпенсировать ошибки, возникающие при захвате объекта, можно, используя матрицы  $D$  или  $D_k$ . Гистограммы этих матриц бимодальны, и поэтому матрицы легко приводятся к бинарному виду.

После этого задача центрирования сводится к смещению эталона таким образом, чтобы объект занял заданное положение относительно оси визирования.

В случае неподвижного объекта матрица сравнений (или матрица  $D_k$ ) будет воспринимать все эталонное изображение как изображение объекта и центрирование производиться не будет.

Для того чтобы исключить вызванные шумами флуктуации вычисляемых координат геометрического центра, перед центрированием производится предварительная обработка бинарной матрицы, о которой сообщалось в ч. I.

Важным компонентом следящих систем является контроль правильности определения текущих координат (скорости) наблюдаемого объекта. Чем больше систем можно использовать, тем надежнее будет получаемый результат.

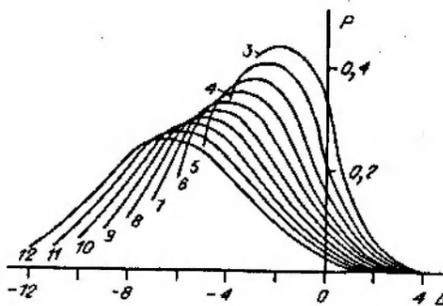


Рис. 3

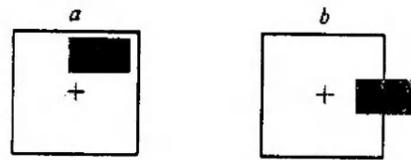


Рис. 4

Обычно в СТЗ используют контроль на выходе, т. е. полученные координаты сравниваются с координатами, тем или иным образом предсказанными по вычислению.

Система контроля I. При сравнении с пошаговым сдвигом эталонного фрагмента ( $n \times n$ ) с фрагментами анализируемого изображения ( $N \times N$ ) образуется матрица значений меры близости (ММБ) размером  $(N - n + 1, N - n + 1)$ , представляющая собой аналог корреляционной матрицы.

Можно оценить вероятность появления какого-либо значения ММБ в случае, когда эталон сравнивается с фрагментом фона, т. е. оценить значения «фоновых» элементов ММБ. Для этого предположим, что эталон и фрагмент описаны признаками, имеющими случайные значения, и используется мера близости  $S_1$ . Тогда легко показать, что значения ММБ будут иметь биномиальное распределение, которое описывается выражением [4]:

$$P_b(k; m, p) = \binom{m}{k} p^k q^{m-k}, \quad (1)$$

где  $p$  — вероятность совпадения признаков,  $q$  — вероятность несовпадения признаков,  $m = n \times n$  — количество элементов эталона и фрагмента,  $k$  — количество совпадений (т. е. значение ММБ). На рис. 5 показана расчетная кривая плотности вероятности значений фоновых элементов ММБ для случая  $m = 16 \times 16$  и пяти используемых классов признаков. Предполагается, что классы признаков равновероятны, т. е.  $p = 0,2$  и  $q = 1 - p = 0,8$ .

Расчетные вероятности хорошо согласуются с экспериментальными [5]. В случае когда на изображении присутствует структурный шум (типа строчной структуры), вероятности будут меняться, но после его устранения закон распределения фоновых элементов остается прежним [5].

Узкий пик вероятности появления значений позволяет при анализе ММБ производить контроль за срывом слежения. Например, для случая, показанного на рис. 5, по максимальному значению ММБ, величина которого меньше 70, нельзя делать вывод о местоположении объекта. Поэтому вид функции распределения определяет порог значений ММБ, ниже которого элементы ММБ не принимаются к рассмотрению. В этом случае фиксируется срыв слежения, вырабатывается сигнал запрета перезаписи эталона, а координаты объекта экстраполируются по предыдущим результатам.

Система контроля II. Матрицы сравнений ( $D$  и  $D_k$ ) позволяют селективировать динамический объект и определять его геометрический центр. Если объект был предварительно центрирован, то вывод о правильности опреде-

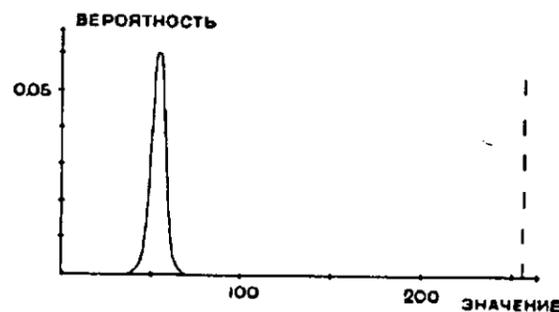


Рис. 5

ления координат объекта делается на основе анализа невязки координат геометрического центра и вычисленных текущих координат.

Процедура анализа невязки при этом такая же, как и в случае выходных координатных фильтров.

Система контроля III. Матрицы сравнений позволяют осуществлять еще один вид контроля. Рассмотрим бинарную МС, в которой единичные элементы соответствуют объекту. При потере объекта (т. е. при срыве слежения) единичные значения МС «сбрасываются» в нулевые. По количеству таких элементов относительно количества единичных элементов в МС в предыдущем кадре и производится контроль.

Даже при полной потере объекта не все единичные значения бинарной МС сбросятся в нулевые. Пусть  $m$  — количество элементов объекта, выделенного из МС, а  $k$  — количество единичных элементов, которые не сбросились при потере объекта. Тогда вероятность того, что не сбросилось  $k$  элементов, будет определяться выражением

$$P_c(k; m, p) = \binom{k}{m} p^k (1-p)^{m-k},$$

где  $p$  — вероятность совпадения признаков фоновых элементов закодированных изображений.

На рис. 6 показана зависимость количества несброшенных элементов (КЭ) в зависимости от размера объекта (РО). Кривая А отражает случай, когда количество несброшенных элементов с вероятностью 0,98 будет лежать ниже этой кривой; аналогично кривой В соответствует вероятность 0,50, а кривой С — 0,02. В расчетах, как и ранее, принималось  $p = 0,20$ , что хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Разность между количеством элементов объекта и количеством несброшенных элементов при потере объекта определяет порог, при котором фиксируется срыв слежения.

Анализ спектров локальных окрестностей точек изображения, проводимый для выделения признаков, может быть использован для автофокусировки устройств наблюдения.

При выделении признаков вычисляются суммы элементов, соответствующих высокочастотным составляющим энергетического спектра локальных окрестностей по четырем направлениям, и находится максимальная из них —  $E_m$ . Составим общую сумму для всех точек эталона:

$$E = \sum_{i,j} E_m(i, j).$$

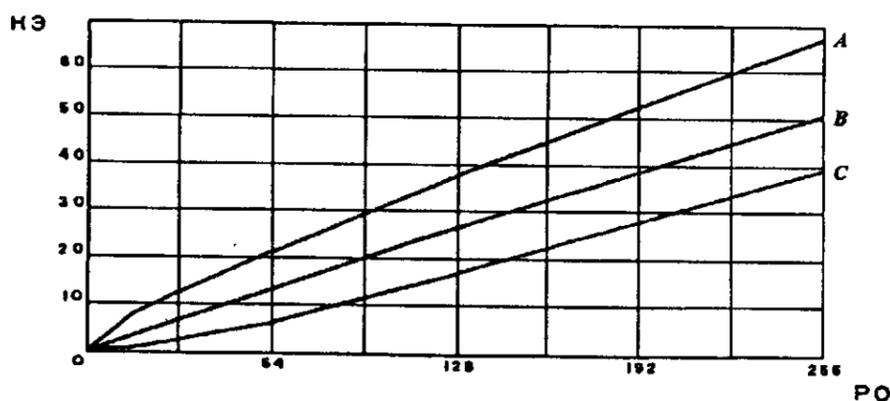


Рис. 6

При расфокусировке изображения высокочастотные составляющие спектров убывают и, следовательно, уменьшается сумма  $E$ . Поэтому критерием сфокусированности изображения может служить максимум суммы  $E$ .

При использовании матрицы сравнений для селекции динамического объекта фокусировка может производиться только по точкам, принадлежащим объекту. В этом случае сумма насчитывается только по точкам, повторяющимся заданное число кадров, и система фокусируется на объекте наблюдения.

Общая структурная схема следящей системы, использующей рассмотренные методы обработки изображений, будет выглядеть, как показано на рис. 7.

Из устройства ввода (телевизионного или тепловизионного) сигнал поступает в блок формирования фрагмента (БФФ), где формируется строб фрагмента, на котором ведется поиск объекта. Захват объекта производится оператором, и фрагмент формируется относительно координат, указанных оператором.

Сформированный фрагмент поступает в блок кодирования (БК), и закодированный фрагмент заносится в запоминающее устройство кодированного фрагмента (ЗУ КФ). В первом кадре после начала слежения формируется эталон, в качестве которого принимается центральная часть фрагмента, и заносится в запоминающее устройство кодированного эталона (ЗУ КЭ). В дальнейшем поиск объекта в текущем кадре ведется по эталону, сформированному в предыдущем кадре. При сравнении фрагмента и эталона определяются координаты эталона относительно фрагмента, которые служат координатами для формирования нового эталона. Обновление эталона происходит после каждого кадра. При этом при перезаписи эталона в блок формирования кодированного эталона (БФКЭ) происходит сравнение элементов старого и нового эталонов и формируется МС, которая запоминается в ЗУ ДМБ. Из ЗУ КФ, ЗУ КЭ и ЗУ ДМБ данные поступают в вычислитель матрицы меры близости (ВММБ), где насчитывается матрица меры близости фрагмента и определяются координаты ее максимального значения, которые поступают в выходной координатный фильтр и в блок управления (БУ) для формирования фрагмента в новом кадре. Разность координат эталона в текущем и предыдущем кадрах из выходного координатного фильтра (ВКФ) поступает на исполнительное устройство.

Системы контроля К I, К II, К III и ВКФ вырабатывают сигнал запрета перезаписи эталона при определении срыва слежения. Запрет перезаписи действует до тех пор, пока объект не будет обнаружен.

Блок фокусировки (БФ) производит автофокусировку устройства ввода (УВ) на объекте наблюдения.

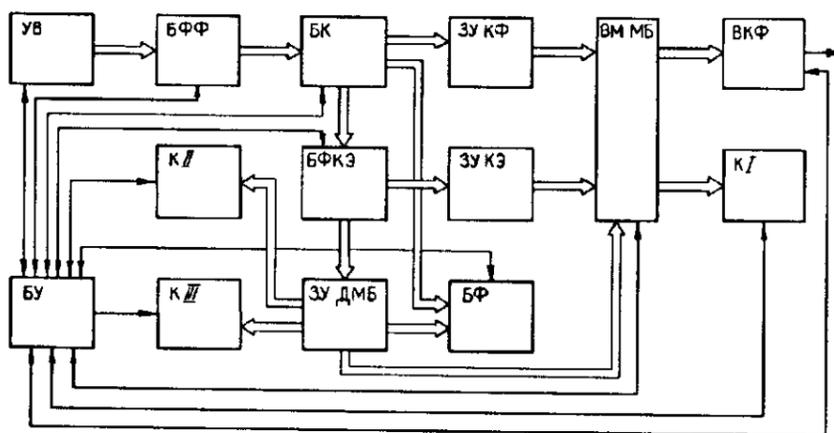


Рис. 7

---

Рассмотренные методы межкадровой обработки изображений реализованы в СТЗ с телевизионными и тепловизионными датчиками видеоинформации и показали хорошие практические результаты. Конечно, частности в решении поставленных задач будут отличаться для различных систем, так как они обусловлены спецификой задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов П. Г. Динамическая мера близости изображений. Ч. I. Выделение движения // Автометрия.—1994.—№ 1.
2. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений.—М.: Наука, 1976.
3. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Теория оценивания и ее приложения в связи и управлении.—М.: Связь, 1976.
4. Корн Н., Корн Т. Справочник по математике для инженеров и научных работников.—М.: Наука, 1973.
5. Попов П. Г., Порядина С. А. Построение анизотропных фильтров для коррекции строчных геометрических шумов // Автометрия.—1991.—№ 2.

*Поступила в редакцию 9 июня 1992 г.*

---