

**М. П. БАЙДАКОВ, Н. Н. КРАСИЛЬНИКОВ,
О. В. ПАСТУХОВ, В. К. ПОТОЦКИЙ**

(Ленинград)

К ВОПРОСУ О РАЗЛИЧИИ НАБЛЮДАТЕЛЕМ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как известно, подавляющее число радиолокационных и телевизионных систем имеет на выходе воспроизводящее устройство, с которого человеком-наблюдателем «считывается» информация в виде изображения. В ряде случаев качество таких систем может быть оценено вероятностью различения воспроизводимых системой изображений, которая ограничивается внутренними шумами.

Проблема расчета систем, в которых получателем информации является человек, состоит в том, что до последнего времени характеристики, описывающие его способность различать изображения в шумах, были неизвестны.

Из радиолокационной практики известно, что при обнаружении отметки цели в шумах наблюдатель дает результаты, близкие к тем, которые получаются при использовании окончательного устройства, работающего в соответствии с байесовским правилом принятия решения (идеальный наблюдатель) [1].

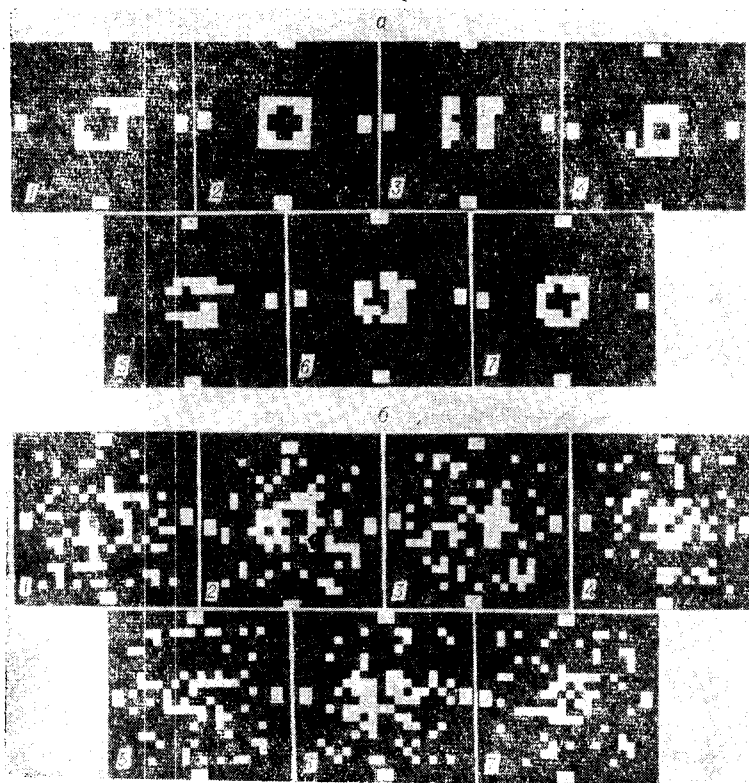
Дж. Светс, Б. Теннер, Т. Бердзалл в [2] выдвинули гипотезу относительно того, что результаты восприятия визуальных и акустических сигналов человеком-наблюдателем могут быть описаны методами теории статистических решений. Однако экспериментально (применительно к задаче визуального восприятия) эта гипотеза подтверждена лишь для случая обнаружения яркостного пятна на шумовом поле при условии фиксированного места появления сигнала без учета его формы, а также закона распределения двумерной помехи.

Влияние формы двумерных сигналов на вероятность их визуального обнаружения и различения исследовалось в работах С. Бейкера [3], Б. В. Варского [4], И. И. Цуккермана [5] и др. Однако эти исследования проводились без привлечения методов теории статистических решений, а поэтому не предлагалось какой-либо теоретической модели, описывающей результаты визуального обнаружения и различения изображений.

Целью настоящей работы является хотя бы частично восполнить существующий пробел, т. е. экспериментально проверить справедливость гипотезы о применимости идеальной статистической модели (по байесовскому критерию) для описания результатов визуального различения реальных изображений.

Для экспериментальной проверки выдвинутой гипотезы было изготовлено семь двухградационных изображений абстрактных фигур

равной площади (см. рисунок, а), каждая из которых состояла из конечного числа растровых элементов (квадратов). Затем эти изображения подвергались воздействию шума путем замены значений яркости растровых элементов на обратную (черный элемент заменялся белым и наоборот). Шум представлял собой некоррелированную последовательность и полностью характеризовался величиной вероятности появления



ошибки $P_{\text{ош}}$ при передаче растрового элемента. На рисунке, б приведены изображения, пораженные шумом для случая $P_{\text{ош}} = 0,225$. Всего было изготовлено по две зашумленные реализации каждого изображения для каждого уровня шума. Затем наблюдателю по очереди предъявлялось зашумленное изображение и предлагалось путем сопоставления с исходными незашумленными образцами (см. рисунок, а) определить, к какому изображению оно относится. Здесь и дальше априорные вероятности предъявления каждого из изображений были равны $1/L$, где L — число изображений, составляющих алфавит (в данном случае $L=7$). Эксперимент проводился в двух различных вариантах.

В первом варианте наблюдателю было точно известно положение возможных фигур на плоскости изображения, которое он мог определить путем наложения прозрачных масок на зашумленное изображение и совмещения их с последним посредством четырех специальных меток, которые имелись и на изображении и на масках (так называемый случай сигнала с полностью известными параметрами).

Во втором варианте, с которым в основном и приходится встречаться на практике, наблюдатель на глаз определял положение фигур;

при этом метки на изображении закрывались специальной, произвольно смещенной рамкой. Условия наблюдения (освещенность, расстояние рассматривания) каждый наблюдатель подбирал такими, какие казались ему наиболее удобными. Заметим, что специально проведенное исследование показало, что эти величины могут варьироваться в широких пределах без сколько-нибудь заметного влияния на вероятность правильного различения изображений. Результаты различения (правильного или неправильного) записывались экспериментатором, но не сообщались наблюдателю. По данным эксперимента вычислялись сред-

Таблица 1

Вероятность различения	Точное местоположение фигур	$p_{ош}$				Число зашумленных реализаций каждого изображения
		0,175	0,205	0,225	0,260	
p_n	Известно	0,97	0,93	0,80	0,52	2
	Неизвестно	0,92	0,70	0,55	0,41	
p_n	Известно	0,96	0,93	0,85	0,57	2
	Неизвестно	0,93	0,76	0,57	0,50	

ние вероятности правильного различения изображений наблюдателем p_n . В эксперименте приняло участие восемь наблюдателей. В табл. 1 приведены результаты эксперимента, представляющие зависимость p_n от $p_{ош}$ (уровня шума), для двух вариантов опыта. Как следует из полученных результатов, знание точного положения различаемых фигур приводит к заметному увеличению вероятности правильного различения по сравнению со случаем, когда точное положение фигуры неизвестно. С точки зрения теории статистических решений, полученный результат не является неожиданным, поскольку в первом варианте опыта наблюдатель имел в своем распоряжении дополнительную информацию, которую он и использовал в процессе наблюдения.

Вторая часть экспериментальной работы была выполнена на специально сконструированном приборе, работающем в соответствии с байесовским правилом.

Применительно к использованному в описываемых экспериментах виду шума критерий, в соответствии с которым принимается решение о принадлежности зашумленного изображения (реализации) к тому или иному изображению фигуры, может быть найден следующим образом. Считая для определенности, что положение возможных фигур на плоскости изображения точно известно, согласно теории статистических решений для зашумленной реализации составим L отношений правдоподобия и отнесем ее к изображению той фигуры, для которой это отношение максимально [6]. Составляя отношение правдоподобия в предположении, что реализация относится к k -му изображению, будем иметь

$$l_k = \frac{\prod_{i=1}^N (1 - p_{ош})^{1 - [f(i) - f_k(i)]^2} p_{ош}^{[f(i) - f_k(i)]^2}}{\prod_{i=1}^N (1 - p_{ош})^{1 - f^2(i)} p_{ош}^{f^2(i)}} \quad (1)$$

Здесь $f(i)$ — функция, описывающая зашумленную реализацию, которая на каждом растровом элементе может принимать только одно из двух значений 0 или 1, поскольку изображение имеет только две градации яркости; i — номер растрового элемента на плоскости изображения; $f_k(i)$ — функция, описывающая k -е изображение, также являющееся двухградационным; N — число растровых элементов, составляющих все изображение, включая участки, не занятые фигурой.

Условие, в соответствии с которым принимается решение о принадлежности реализации $f(i)$ к k -му изображению $f_k(i)$, запишем так:

$$\frac{l_k}{l_r} > 1, \quad (2)$$

где $r=1, \dots, L$; $r \neq k$. Подставляя в (2) выражения для l_k и l_r и логарифмируя его, после несложных алгебраических преобразований получим

$$\left[\ln \frac{(1-p_{\text{ош}})}{p_{\text{ош}}} \right] \sum_{i=1}^N \{ [f(i) - f_r(i)]^2 - [f(i) - f_k(i)]^2 \} > 0. \quad (3)$$

Так как $0 \leq p_{\text{ош}} \leq 0,5$ (самая сильная помеха будет иметь место при $p_{\text{ош}} = 0,5$) и, следовательно, $\ln \frac{1-p_{\text{ош}}}{p_{\text{ош}}} > 0$, то правило решения запишем в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N [f(i) - f_k(i)]^2 < \sum_{i=1}^N [f(i) - f_r(i)]^2. \quad (4)$$

Можно показать, что аналогичное правило имеет место и тогда, когда положение фигур на плоскости изображения заранее точно неизвестно. В этом случае процесс различения включает в себя дополнительную операцию, заключающуюся в определении положения фигуры на изображении.

В работе использовался прибор, представляющий собой теледиапедатчик с «раздвоенным бегущим лучом», световой поток в котором расщеплялся посредством полупрозрачного зеркала на два канала. В одном из каналов устанавливался диапозитив исследуемого зашумленного изображения, во втором вставлялись по очереди диапозитивы незашумленных изображений, с которыми производилось сравнение. Диапозитивы были изготовлены путем перефотографирования изображений, используемых в первой части эксперимента. Диапозитивы могли перемещаться в плоскости их установки посредством специального устройства. С выхода каждого из каналов сигналы подавались на схему вычитания, на выходе которой были включены последовательно квадратирующее и интегрирующее устройства. Далее с выхода интегрирующего устройства напряжение, пропорциональное среднему квадрату разности, подводилось к стрелочному прибору, с которого снимались отсчеты. Решение о принадлежности зашумленного изображения тому или иному незашумленному образцу принималось по минимуму среднего квадрата разности, что соответствует условию (4). Описываемая часть эксперимента, в которой использовался прибор, так же как и первая (с наблюдателем), была выполнена в двух вариантах.

В первом варианте, когда положение фигуры на плоскости изображения точно известно, диапозитивы в обоих каналах «совмещались» по четырем специальным меткам, имеющимся на них. О моменте совмещения можно было судить по исчезновению изображения меток на специальном видеоконтрольном устройстве.

Во втором варианте измерений, когда положение фигур на плоскости изображения заранее точно неизвестно, за наилучшее «совмещение» диапозитивов принималось такое, при котором сигнал среднего квадрата разности достигал минимума.

В табл. 1 представлены результаты измерений вероятности правильного различения изображений с помощью прибора P_n . При сравнении результатов измерений средней вероятности различения изображений, полученных с помощью наблюдателя P_n и прибора P_n , обращает на себя внимание их практическое совпадение. Более детальный анализ показал, что это совпадение имеет место только в среднем, поскольку только часть номеров изображений, правильно различенных посредством прибора, совпадала с номерами изображений, правильно различенных наблюдателями. Аналогичная картина имела место и при сравнении результатов различения двух наблюдателей. Это явление может быть объяснено, если наблюдателю приписать некоторый небольшой «собственный шум», который накладывался на зашумленное изображение и в каждом отдельном случае приводил к изменению результирующей шумовой реализации, наложенной на исходное изображение*. Величина «собственного шума» должна быть небольшой, иначе это привело бы к заметному уменьшению P_n по сравнению с P_n .

Высказанное предположение было проверено путем наложения на показание прибора эквивалентного «собственного шума» посредством прибавления и вычитания случайных чисел, распределенных в соответствии с нормальным законом. Оказалось возможным подобрать такой уровень «собственного шума», при котором вероятность правильного различения почти не снижалась, в то время как совпадение номеров, правильно различенных изображений прибором без «собственного шума» и с ним, было нарушено в той же степени, что и при работе с наблюдателем.

Описанные выше эксперименты были многократно повторены с использованием в качестве исходных алфавитов: 1) двухградационных изображений самолетов $L=7$ (тест T_1); 2) двухградационных изображений дорожно-строительной техники $L=20$ (тест T_2); 3) русского буквенного алфавита $L=31$ (тест T_3). Все эти изображения передавались по «шумящему» каналу с кодо-импульсной модуляцией при двух уровнях квантования с помощью фототелеграфа; при этом, помимо помехи канала, на изображение накладывался также шум дискретизации.

Наконец, эксперименты были повторены применительно к различению пар изображений абстрактных фигур, имеющих неодинаковую структуру. В первом случае использовалась пара изображений, которые при наложении друг на друга дают разность в виде «сосредоточенной массы» (тест T_4). Во втором случае выбиралась пара изображений, которые при наложении дают разность в виде «разбросанной массы». Всего было выполнено около 10 000 измерений, результаты которых представлены в табл. 2. Результаты повторных экспериментов совпадают с ранее полученными (см. табл. 1).

На основании изложенного можно сделать вывод, что наблюдатель при различении двухградационных изображений, маскируемых некоррелированным шумом, обеспечивает примерно ту же среднюю вероятность правильного различения, что и прибор, алгоритм работы которого

* По-видимому, этот дополнительный «собственный шум», приводящий к незначительному уменьшению P_n , обусловлен тем, что наблюдатель не может точно определить размеры зашумленной фигуры (т. е. имеет неполную информацию), подобно тому как незнание точного положения фигуры на плоскости изображения приводит к уменьшению P_n .

Таблица 2

Тест	Точное место-положение фигур	Вероятность различения	$P_{ош}$						Число зашумленных реализаций каждого изображения
			0,150	0,250	0,270	0,285	0,300	0,350	
T ₁	Неизвестно	$P_{п}$	0,76	0,57	—	—	—	—	2
		$P_{н}$	0,76	0,48	—	—	—	—	
T ₂	"	$P_{п}$	0,75	0,45	—	—	—	—	1
		$P_{н}$	0,65	0,45	—	—	—	—	
T ₃	"	$P_{п}$	0,97	0,80	—	—	0,50	0,23	1
		$P_{н}$	0,94	0,64	—	—	0,52	0,23	
T ₄	"	$P_{п}$	—	—	0,80	0,70	0,50	—	10
		$P_{н}$	—	—	0,80	0,70	0,50	—	
T ₅	"	$P_{п}$	—	—	0,80	0,70	0,65	—	10
		$P_{н}$	—	—	0,77	0,73	0,67	—	

определяется байесовским правилом*. Следует иметь в виду, что этот вывод справедлив при выполнении условий, реализованных в описанных экспериментах, а именно: при равенстве априорных вероятностей появления подлежащих различению изображений, равенстве между собой штрафов за ошибочные решения и равенстве нулю штрафов за правильные решения.

Таким образом, для случая, реализующего указанные условия, экспериментально подтверждена применимость методов теории статистических решений (байесовского критерия) для описания результатов визуального различения.

Сказанное в значительной степени проливает свет на алгоритм работы наблюдателя, давая ключ к решению ряда практических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пороговые сигналы. М., «Советское радио», 1952.
2. Дж. Светс, Б. Теннер, Т. Бердзалл. Статистическая теория решений и восприятие.— В сб. «Инженерная психология». М., «Прогресс», 1964.
3. С. Вакег. Man and Radar Displays. Pergamon Press, 1962.
4. Б. В. Варский (ред.). Вопросы статистической теории распознавания. М., «Советское радио», 1967.
5. И. И. Цуккерман и др. Об опознавании образов в зрительной системе.— В сб. «Биологические аспекты кибернетики». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1962.
6. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники, т. II. М., «Советское радио», 1968.

Поступила в редакцию
15 сентября 1969 г.,
окончательный вариант —
18 ноября 1969 г.

* Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные позволяют также ожидать, что и в случае полутонных изображений, маскированных гауссовым шумом, результаты будут аналогичными, хотя исследования в этом направлении еще не закончены.