

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



№ 843

12/1-74

C-655

P10 - 7569

Л.М.Сороко, Т.А.Стриж

1845/2-74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ГИЛЬБЕРТА  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ  
КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗОВ

**1974**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P10 - 7569

Л.М.Сороко, Т.А.Стриж

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ГИЛЬБЕРТА  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ  
КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Сороко Л.М., Стриж Т.А.

P10 - 7569

Информационные признаки Гильберта и их применение для классификации образов

Вводятся информационные признаки Гильберта, использование которых вместе с информационными признаками Фурье увеличивает размерность пространства признаков, формируемых оптическим каскадом при когерентном освещении, с трех до восьми.

Приводятся значения компонент опорных векторов информационных признаков в шестимерном пространстве для нескольких букв латинского алфавита.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1974

Soroko L.M., Strizh T.A.

P10 - 7569

Hilbert Information Features and Their Application for Pattern Recognition

The Hilbert information features are introduced. Use of these features together with the Fourier information features increases the dimensionality of feature space formed by the optical cascades at the coherent lighting from 3 to 8.

The values of the reference vector components for the information features in the six-dimensional space are presented for several letters of the Roman alphabet.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1974

Автоматическое распознавание образов является узловым элементом многих информационных систем и имеет важное научное и народно-хозяйственное значение. Например, без автоматических классификаторов образов невозможно создать быстродействующие информационно-поисковые и библиографические системы, устройства автоматической обработки спектральной и трековой информации в физике, автоматические системы контроля стандартных элементов микроэлектроники и, наконец, надежные системы отбраковки изделий в условиях массового производства.

Как известно<sup>1/</sup>, задача автоматических систем распознавания образов заключается в том, чтобы произвести классификацию исходного множества объектов на основе заданных требований. При этом объекты, принадлежащие одному классу образов, обладают определенным набором общих свойств.

Простейший подход к проблеме распознавания образов, по-видимому, заключается в сопоставлении каждого элемента множества заданных объектов с эталонами, характеризующими классы образов. Полный массив эталонов хранится в памяти распознающего устройства. В случае, если входной образ лучше всего соответствует какому-то эталону, его относят к тому классу образов, представителем которого является данный эталон. Такой подход используют при автоматическом чтении печатных букв и цифр.

Более совершенный подход заключается в том, чтобы вместо сравнения входного образа с эталонами классификацию производить на некотором множестве

отобранных замеров входных образов. Если замеры, называемые "информационными признаками", оказываются инвариантными или малочувствительными к помехам и искажениям на входе и обладают небольшой избыточностью, то процесс распознавания сводится к двум этапам.

На первом этапе находят множество признаков. Затем формулируют алгоритмы осуществления замеров, а также указывают правила их упорядочения. Наконец, устанавливают критерии отбора. На втором этапе производят сам процесс классификации. Опираясь на значения отобранных признаков, принимают решения о принадлежности входного образа к тому или иному классу.

Если у каждого входного образа имеется  $N$  признаков, то упорядоченное множество образует вектор признаков  $X$  в  $N$ -мерном пространстве признаков  $\Omega_X$ . Задача классификации состоит в том, чтобы разбить эти векторы по соответствующим классам образов. На языке математики задача классификации формулируется с помощью разделяющей функции.

Одним из критериев работы классификатора является критерий минимального расстояния, т.е. расстояния между входным образом и множеством эталонных векторов в пространстве признаков. Например, если заданы  $m$  опорных векторов  $R_1, R_2, \dots, R_m$ , каждый из которых отвечает одному классу образов  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ , соответственно, то входной сигнал  $X$  относят к классу  $\omega_j$ , если расстояние между  $X$  и  $R_j$ , равное  $|X - R_j|$ , оказывается минимальным для индекса  $j$ .

В настоящее время широкое распространение получили распознающие устройства, в которых используется принцип оптической согласованной фильтрации<sup>/2-4/</sup>. Главным элементом этих устройств является оптический каскад, схема работы которого<sup>/2/</sup> описывается в терминах двойной дифракции (рис. 1). Транспарант с входным сигналом  $f(x, y)$ , устанавливаемый в плоскости  $P_1$ , просвечивается коллимированным пучком света от лазера  $La$ . Линза  $L_1$  осуществляет пространственное преобразование Фурье. В плоскости  $P_2$  отображается

Фурье-образ сигнала  $f(x, y)$ . Фильтр пространственных частот  $G(\omega_x, \omega_y)$  пропускает только необходимые компоненты пространственных частот. Линза  $L_2$  осуществляет обратное преобразование Фурье. В плоскости  $P_3$  отображается отфильтрованный сигнал  $g(x, y)$ . Изменяя структуру фильтра пространственных частот  $G(\omega_x, \omega_y)$ , получают различные отфильтрованные сигналы  $g(x, y)$ .

Достоинством оптического каскада при когерентном освещении является инвариантность местонахождения сигнала, поданного во входную плоскость  $P_1$ . Недостатком оптического каскада является зависимость выходного сигнала от ориентации и масштаба распознаваемого образа.

В подобных системах используется полная информация о Фурье-образе входных сигналов. Однако стоит Фурье-образ как комплекснозначную функцию превратить в распределение интенсивности или двумерную периодограмму, как в системе распознавания возникнут двузначности. Наиболее типичный пример этой двузначности - события рассеяния частицы на угол  $\theta$  или  $\theta + \pi$  (рис. 5). Появление этой неоднозначности в системах Фурье-оптики приводит к тому, что структуру периодограммы необходимо изучать в области высоких пространственных частот<sup>/7/</sup>.

В данной работе предложен другой путь, который является альтернативой голографического метода. Сохраняя систему когерентной в формирующей части и некогерентной по приёмнику излучения, авторы ввели дополнительные информационные признаки. Это - информационные признаки Гильберта, использование которых вместе с информационными признаками Фурье позволяет увеличить размерность пространства признаков с трех до восьми.

Если линза  $L_1$  (рис. 1) - сферическая, то оптический каскад осуществляет двумерное преобразование Фурье. Если линза  $L_1$  - цилиндрическая, причём образующая цилиндра направлена вдоль оси  $y$ , то такая линза осуществляет одномерное вдоль оси  $x$  преобра-

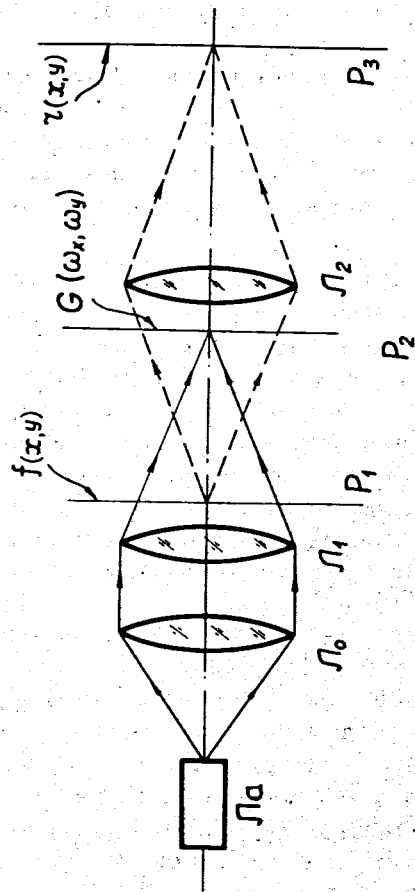


Рис. 1. Схема оптического каскада при когерентном освещении. Линза  $L_0$  формирует свет от лазера  $L_0$  в коллимированный пучок света. Линза  $L_1$  осуществляет прямое преобразование Фурье. Входной сигнал находится в плоскости  $P_1$ . В плоскости  $P_2$ , где отображается Фурье-образ входного сигнала  $f(x, y)$ , устанавливается пространственный фильтр  $G(\omega_x, \omega_y)$ . Линза  $L_2$  осуществляет обратное преобразование Фурье. В плоскости  $P_3$  отображается отфильтрованный сигнал  $z(x, y)$ .

зование Фурье. Наконец, если линза  $L_1$  - цилиндрическая и образующая цилиндра направлена вдоль оси  $x$ , то такая линза осуществляет одномерное вдоль оси  $Y$  преобразование Фурье.

Рассмотрим алгоритмическую схему работы системы с использованием информационных признаков Гильберта на примере Фурье-оптики, содержащей дифракционную решетку со сбоем<sup>5,6/</sup> как один из возможных элементов осуществления преобразования Гильберта. Если оптическая ось системы проходит через линию сбоя дифракционной решетки со сбоем (рис. 2), то функция  $G(\omega)$  имеет вид

$$G(\omega) = 1 + \cos \omega x_0 \operatorname{sgn} \omega, \quad (1)$$

$$\text{где } \operatorname{sgn} \omega = \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn} \omega = \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

После обратного преобразования Фурье, осуществляемого линзой  $L_2$ , в плоскости  $P_3$  появится сигнал

$$\begin{aligned} r(x) &= \hat{\mathcal{F}}^{-1} \{ F(\omega) G(\omega) \} = \\ &= \hat{\mathcal{F}}^{-1} [ F(\omega) + F(\omega) \cos \omega x_0 \operatorname{sgn} \omega ] = \\ &= f(x) + \frac{1}{2} f(x) \otimes g(x) [ \delta(x-x_0) + \delta(x+x_0) ]. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как

$$g(x) = \hat{\mathcal{F}}^{-1} [ \operatorname{sgn} \omega ] = \frac{2}{ix}, \quad (4)$$

то выражение (3) запишется следующим образом:

$$r(x) = f(x) + \frac{1}{2i} \chi(x) \Big|_{x=x_0} + \frac{1}{2i} \chi(x) \Big|_{x=-x_0}, \quad (5)$$

где

$$\chi(x) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{f(x') dx'}{x-x'} \quad (6)$$

- гильберт - образ функции  $f(x)$ .

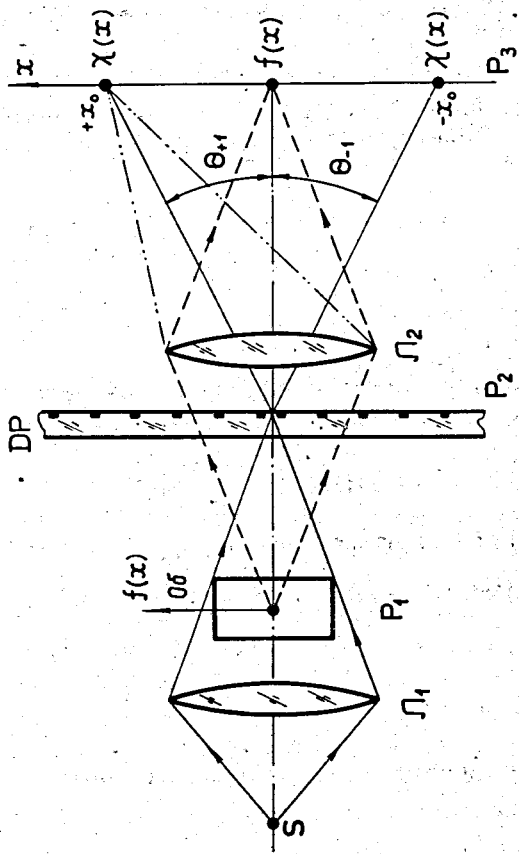


Рис. 2. Схема оптического каскада, функцию пространственного фильтра в котором выполняет дифракционная решетка со сбоем DP. Вокруг точки  $x = 0$  плоскости  $P_3$  отображается исходный сигнал  $f(x)$ . В точках  $x = x_0$  и  $x = -x_0$  отображаются гильберт-образы  $\chi(x)$  сигнала  $f(x)$ .

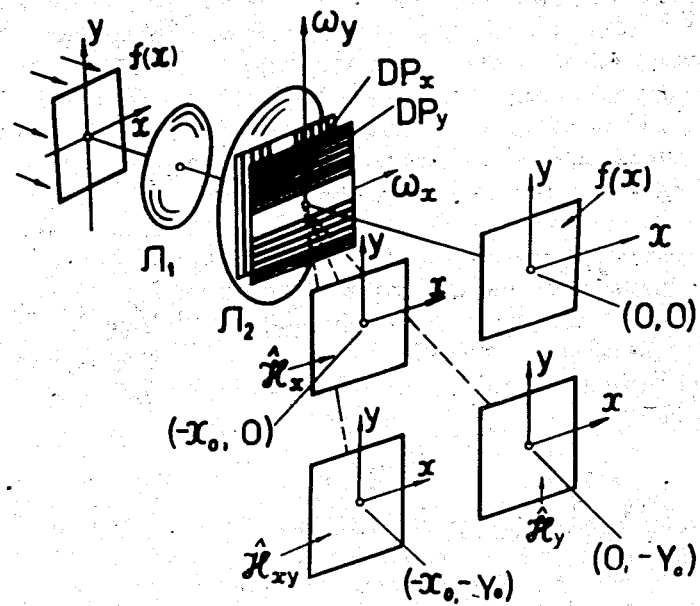


Рис. 3. Схема оптического каскада, пространственный фильтр в котором изготовлен в виде двух дифракционных решеток со сбоем, совмещенных своими плоскостями. Штрихи решеток перпендикулярны друг другу, а линии сбоя центрированы на оптической оси. В выходной плоскости отображаются три независимых гильберт-образа входного сигнала  $f(x, y)$ . Два одномерных гильберт-образа по оси  $x$  и по оси  $y$  располагаются в первых порядках дифракции света от каждой дифракционной решетки со сбоем. Двухмерный гильберт-образ находится в перекрестном порядке дифракции света на двух решетках.

Первое слагаемое в (5), описывающее нулевой порядок дифракции света на дифракционной решетке со сбоем, отображает исходный сигнал  $f(x)$  без каких-либо изменений. Второе слагаемое, описывающее первый порядок дифракции света, равно гильберт-образу входного сигнала, центрированному вокруг точки  $x = x_0$  (см. рис. 2). Третье слагаемое, также равное гильберт-образу входного сигнала, располагается вокруг точки  $x = -x_0$  в минус первом порядке дифракции.

Если в качестве фильтра  $G(\omega_x, \omega_y)$  использовать две дифракционные решетки со сбоем, штрихи которых взаимно перпендикулярны, то в плоскости  $P_3$  отображаются три независимых гильберт-образа<sup>/6/</sup> (рис. 3):

1) одномерный гильберт-образ двумерного сигнала  $f(x, y)$ , когда преобразование Гильберта ведется вдоль оси  $x$ :

$$\hat{H}_x [f(x, y)]_{x=x_0} = \frac{1}{\pi} \int_{y=y_0} \frac{f(\xi, y) d\xi}{(\xi - x)} \quad (7)$$

2) одномерный гильберт-образ сигнала  $f(x, y)$ , когда преобразование Гильберта ведется вдоль оси  $y$ :

$$\hat{H}_y [f(x, y)]_{y=y_0} = \frac{1}{\pi} \int_{x=x_0} \frac{f(x, \eta) d\eta}{(\eta - y)} \quad (8)$$

3) двумерный гильберт-образ сигнала  $f(x, y)$ , когда преобразование Гильберта ведется как вдоль оси  $x$ , так и вдоль оси  $y$ :

$$\hat{H}_{xy} [f(x, y)]_{x=x_0} = \left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \iint \frac{f(\xi, \eta) d\xi d\eta}{(\xi - x)(\eta - y)} \quad (9)$$

Первые два гильберт-образа сосредоточены в первых порядках дифракции, соответственно вдоль оси  $x$  или вдоль оси  $y$ , а двумерный гильберт-образ<sup>/9/</sup> расположен в первом перекрестном порядке дифракции.

Для построения информационных признаков берем следующие интегральные образы исходного сигнала  $f(x, y)$ :

- 1) двумерный фурье-образ  $F_{xy}(\omega_x, \omega_y)$
- 2) одномерный фурье-образ вдоль оси  $x$ ,  $F_x(\omega_x, y)$
- 3) одномерный фурье-образ вдоль оси  $y$ ,  $F_y(x, \omega_y)$
- 4) двумерный гильберт-образ  $H_{x,y}(x, y)$ ;
- 5) одномерный гильберт-образ вдоль оси  $x$ ,  $H_x(x, y)$ ;
- 6) одномерный гильберт-образ вдоль оси  $y$ ,  $H_y(x, y)$ ;
- 7) перекрестный одномерный фурье-образ вдоль оси  $x$  и одномерный гильберт-образ вдоль оси  $y$ ,  $F_x H_y(\omega_x, y)$ ;
- 8) перекрестный одномерный гильберт-образ вдоль оси  $x$  и одномерный фурье-образ вдоль оси  $y$ ,  $H_x F_y(x, \omega_y)$ .

Здесь

$$F_x(\omega_x, y) = \int f(x, y) e^{-i\omega_x x} dx \quad (10)$$

$$F_y(x, \omega_y) = \int f(x, y) e^{-i\omega_y y} dy \quad (11)$$

$$F_{x,y}(\omega_x, \omega_y) = \iint f(x, y) e^{-i\omega_x x} e^{-i\omega_y y} dx dy \quad (12)$$

$$F_x H_y(\omega_x, y) = \frac{1}{\pi} \iint \frac{f(x, \eta) e^{-i\omega_x x}}{(\eta - y)} dx d\eta \quad (13)$$

$$H_x F_y(x, \omega_y) = \frac{1}{\pi} \iint \frac{f(\xi, y) e^{-i\omega_y y}}{(\xi - x)} d\xi dy. \quad (14)$$

В качестве информационных признаков классификаторов образов с использованием преобразований Гильберта взяты показатели, которые являются интегральными нелинейными образами картин распределения интенсивностей всех восьми образов. При этом

$$i_0 = w^{-1} \int |F_{xy}(\omega_x, \omega_y)|^4 d\omega_x d\omega_y$$

$$i_1 = w^{-1} \int |F_x(\omega_x, y)|^4 d\omega_x dy$$

$$i_2 = w^{-1} \int |F_y(x, \omega_y)|^4 dx d\omega_y$$

$$i_3 = w^{-1} \int |H_x(x, y)|^4 dx dy$$

$$i_4 = w^{-1} \int |H_y(x, y)|^4 dx dy$$

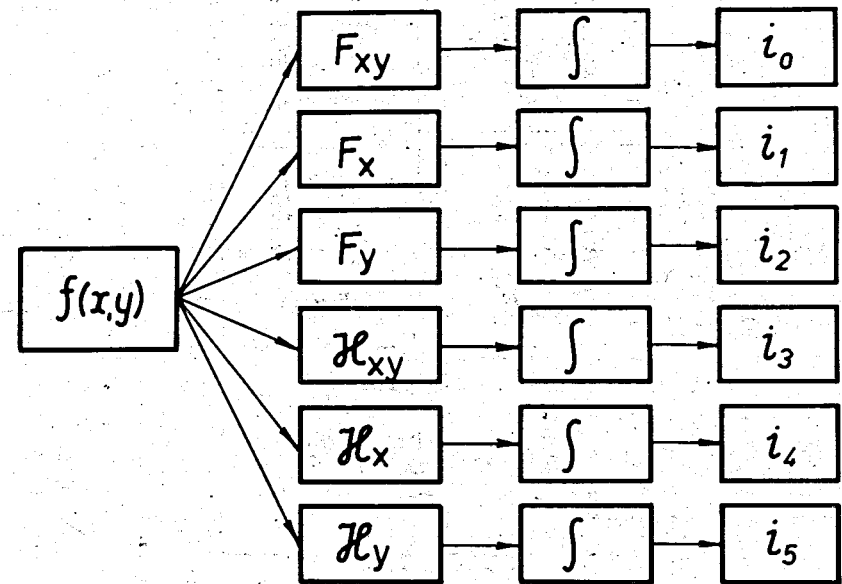


Рис. 4. Алгоритм формирования информационных признаков с использованием нелинейных преобразующих элементов.



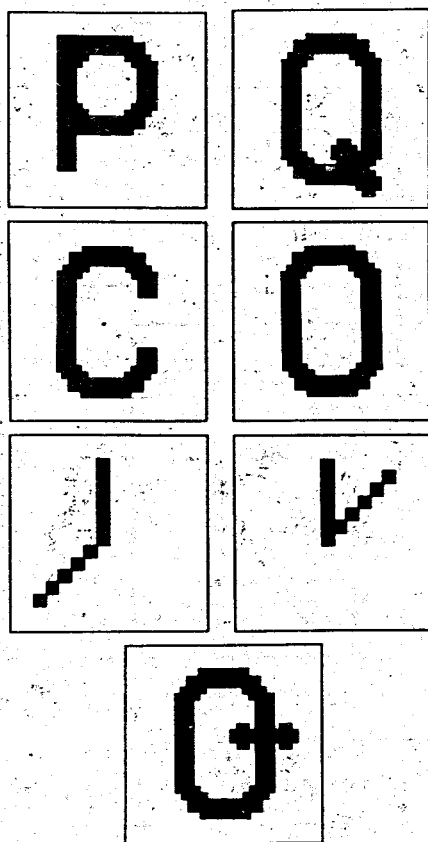


Рис. 5. Буквы латинского алфавита, испорченная буква O или Q и два трековых события, для которых были вычислены шесть информационных признаков. Размер раstra 16 x 16.

$$i_k = \frac{\int |F|^4 d\omega}{\int |F|^2 d\omega}$$

	$i_0$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$
P	31,13	1,06	2,43	6,04	7,27	6,86
Q	43,29	0,848	2,08	7,40	6,42	6,94
C	23,85	0,696	1,10	7,83	6,12	5,90
O	30,59	0,677	1,68	7,81	6,03	6,99
G	41,46	0,887	1,65	9,40	6,32	6,77
⊙	0,161	0,004	0,08	0,44	0,36	0,53
⊙	0,161	0,010	0,08	0,33	0,40	0,53

Рис. 6. Значения шести информационных признаков Гильберта для изображений, приведенных на рис. 5.

$$i_5 = w^{-1} \int |H_{x,y}(x,y)|^4 dx dy$$

$$i_6 = w^{-1} \int |F_x H_y(\omega_x, y)|^4 d\omega_x dy \quad (15)$$

$$i_7 = w^{-1} \int |H_x F_y(x, \omega_y)|^4 dx d\omega_y,$$

где

$$w = \int |f(x,y)|^2 dx dy = \int |F(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y \quad (16)$$

Алгоритм формирования шести из восьми информационных признаков показан на рис. 4. Эти информационные признаки не обладают инвариантностью к сдвигам и изменению масштаба. Поэтому их можно применять только там, где входные сигналы достаточно точно центрированы во входном кадре, например, для автомата, который классифицирует буквы, цифры и другие символы, напечатанные на пишущей машинке или пробитые на перфораторе.

В качестве примеров были выбраны простейшие сигналы, заданные в растре размером 16 x 16 (рис. 5): несколько букв латинского алфавита, в том числе испорченная буква O или Q, и два трековых события. На рис. 6 приведены значения шести информационных признаков для семи входных сигналов.

Существенно, что без использования преобразования Гильберта оптический каскад с использованием сферических и цилиндрических линз позволяет сформировать только три информационных признака:  $i_0, i_1, i_2$ .

Привлечение информационных признаков Гильберта, формируемых с помощью двух дифракционных решеток со сбоем, увеличивает число признаков с трех до восьми. Соответственно возрастает размерность пространства признаков, что, несомненно, должно облегчить работу системы по критерию минимального расстояния.

Необходимо, однако, помнить, что не все информационные признаки Гильберта являются попарно линейно независимыми. При этом информационные признаки  $i_0$  и  $i_5$  нечувствительны к повороту сигнала. Информационные признаки  $i_1, i_2, i_3, i_4, i_6$  и  $i_7$ , являются признаками, чувствительными к ориентации сигнала.

#### Литература

1. К.Фу. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин, "Наука", Москва, 1971.
2. Л.М.Сороко, Основы голографии и когерентной оптики. "Наука", Москва, 1971.
3. В.Д.Свет. Оптические методы обработки сигналов. "Энергия", Москва, 1971.
4. Г.С.Кондратенков. Обработка информации когерентными оптическими системами. Советское радио, 1972.
5. Л.М.Сороко, В.А.Суетин. Сообщение ОИЯИ, P13-6565, Дубна, 1972.
6. Л.М.Сороко, Т.А.Стриж, В.А.Суетин. Сообщение ОИЯИ, P13-6607, Дубна, 1972.
7. Л.М.Сороко. Применение голографии в физике высоких энергий, ЭЧАЯ, 1972, 3, вып. 3, 688-732, см. стр. 723-727.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 марта 1974 года.