

УДК 62.000.4

В. А. БАХТИГОЗИН, Ю. П. БУГАЙ, канд. техн. наук,
Ю. А. КУМАНИН, В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ I

Функциональное подобие нервных и голографических систем, отмеченное многими исследованиями, послужило причиной возникновения целого направления в моделировании нервной системы — биоголографии. Особый интерес представляет возможность взаимного обогащения представлений, установившихся в физической оптике и нейрофизиологии, касающихся способов записи, хранения и воспроизведения информации.

Как отмечалось в работе [1], функциональная аналогия нервных и голографических систем почти не распространяется на структурные особенности тех и других систем. В нервной системе, за исключением некоторых структур мозжечка, не обнаружены процессы, которые по своим динамическим характеристикам могли бы быть поставлены в соответствие процессами образования интерференционной картины при записи изображений в области физической оптики. Если даже в диапазоне частот, наблюдаемых в различных участках нервной системы, и будут обнаружены колебания, которые могли бы играть роль «опорных» и «предметных» колебаний (аналоги опорного луча или предмета и предметного луча в голографии), то полоса частот этих колебаний не может обеспечить по информационной емкости процессы обработки огромных потоков информации в нервной системе.

Однако широкая разветвленность связей между элементами нервной системы, определяющая параллельность обработки информации и возможность реализации распределенных пространствен-

ных кодов в нервных структурах, обеспечивает большие возможности использования спектра пространственных частот с необходимой информационной емкостью.

Проведенный нами сравнительный анализ функциональных и структурных особенностей зрительного и слухового анализаторов и голографических систем показал, что в нервных структурах возможен другой процесс реализации надежного помехоустойчивого кодирования, хранения и воспроизведения информации, отличный от голографического по динамическим характеристикам, но сходный с ним в функциональном отношении. Это сходство основано прежде всего на пространственной распределенности нервных и голографических кодов. Распределенность пространственного кодирования в нервных структурах, как отмечалось ранее [1], обеспечивается разветвленной системой связей между элементами нервной системы. Функциональным аналогом фазовых характеристик волновых процессов в голографических системах является возбуждающий и тормозящий характер связей в нервной системе.

Нервным структурам и голографическим системам может быть поставлена в соответствие общая формальная модель для описания процессов обработки информации в тех и других системах. В общем случае эта модель может быть представлена в виде интегрального преобразования с однородным или неоднородным, стационарным или нестационарным ядром преобразования. Физической интерпретацией ядер интегрального преобразования могут служить законы распределенного влияния отдельных элементов нервной системы на целую область других ее элементов. Другой физической интерпретацией этих ядер могут быть способы распределения информации об интенсивности полезного изображения в некогерентных оптических системах. Общая возможность такой интерпретации была описана в работах [1, 2]. В настоящем сообщении описана базовая оптическая моделирующая система со специальными масками, посредством которых может быть осуществлено распределенное пространственное кодирование — декодирование пространственных изображений в некогерентном свете. Соответствующие этим маскам ядра интегральных преобразований могут быть приравнены способам пространственного кодирования сигналов в зрительном анализаторе нервной системы.

В рассматриваемом ниже безлинзовом варианте оптической моделирующей системы реализуется интегральная операция свертки двух функций, одна из которых описывает распределение освещенности входного изображения, другой является функция влияния оптической системы. Результат операции над входным сигналом фиксируется фотографическим способом в выходной плоскости системы. Распределению освещенности в выходной плоскости соответствует распределение прозрачности диапозитива, полученного при фотографировании выходного сигнала. Функция влияния системы (ядро преобразования) задается формой апертурной маски, устанавливаемой между исходным объектом (например, диапозитивом входного изображения) и экраном в выходной плоскости, на

котором можно визуальнo наблюдать выходной сигнал (при использовании видимого света).

Аналогичные оптические системы в линзовом и безлинзовом вариантах были описаны ранее [2] в качестве устройств, моделирующих детекторы элементарных признаков зрительного анализатора. В этих системах с помощью апертурных масок реализуются согласованные фильтры, осуществляющие подчеркивание того или иного выделяемого признака (кривизна линии, ориентация прямолинейного отрезка и др.).

Рассматриваемые ниже способы кодирования в отличие от фильтрации представляют собой обратимые процессы обработки входного пространственного сигнала, т. е. предполагают возможность по образцу объекта воспроизводить его прообраз. Эта особенность операции кодирования-декодирования должна быть заложена в свойствах функции влияния кодирующей и декодирующей систем. Воспроизведение исходного изображения с достаточной степенью точности возможно в такой системе, если ее функция влияния, соответствующая конкретной апертурной маске, будет удовлетворять двум условиям:

- 1) ее автосвертка должна быть близка к дельта-функции

$$G(\vec{x}) * G(\vec{x}) \approx \delta(\vec{x}); \quad (1)$$

- 2) частота среза $\vec{f}_{x\max}$ спектра функции влияния системы $q(\vec{f}_x)$ должна быть не ниже частот, которые содержатся во входном изображении; для этого функция $g(\vec{f}_x)$ не должна быстро спадать.

Оптическая моделирующая система

Описываемый способ кодирования пространственных объектов, при котором преобразованное изображение объекта, освещенного некогерентным светом, формируется в выходной плоскости, имеет много общего со способом формирования голограмм в когерентном свете и может быть назван квазиголографическим. При этом каждая точка исходного объекта, как и в нетеневого голограмме, представлена не одной точкой, а пространственным узором освещенности, форма которого определяется соответствующей визуальной проекцией апертурной маски.

Накладывающиеся друг на друга проекции маски от всех точек исходного объекта образуют в выходной плоскости системы сложное распределение интенсивности света. Зафиксированное в выходной плоскости на фотоматериале распределение интенсивности света можно назвать квазиголограммой исходного объекта. Благодаря пространственной избыточности представления каждой точки исходного объекта даже не большая часть квазиголограммы имеет информацию обо всем объекте в целом. В связи с этим квазиголограмма так же, как и голограмма, малочувствительна к локальным помехам и повреждениям (царапинам, трещинам, загрязнениям и т. п.).

Квазиголографический способ записи пространственных сигнала

лов в некогерентном свете является разновидностью избыточного кодирования сигналов, непрерывным аналогом дискретного избыточного кодирования с помощью логических (n, k) -кодов и матричных линейных кодов [3, 4]. Однако в дискретных системах, предназначенных для надежных вычислений или надежной передачи информации, кодирования с использованием (n, k) -кодов приводит к сигнальной (временной) либо к канальной (аппаратурной) избыточности.

Рассматриваемая оптическая система квазиголографической записи пространственных сигналов также осуществляет избыточное кодирование. Но в отличие от дискретных систем в ней избыточность не связана с дополнительными затратами времени и использованием дополнительной аппаратуры. Квазиголографическая система обрабатывает сигналы практически мгновенно и одновременно по всему полю входного сигнала, что выгодно отличает ее от устройств аналогичного назначения, в которых первым необходимым этапом обработки изображений является сканирование.

С помощью описываемой системы можно записывать и воспроизводить не только двухмерные, но и трехмерные пространственные сигналы. Последнее возможно благодаря тому, что точки объекта, отстоящие от маски на различное расстояние, в одной и той же выходной плоскости дают проекции апертурной маски различных размеров. При воспроизведении эти проекции формируют локальные максимумы освещенности (пространственную дельта-функцию в математической модели) в тех же местах, где находились в пространстве соответствующие точки при записи. Точное соотношение линейных размеров в трех измерениях объекта и воспроизведенного изображения описывается простыми соотношениями геометрической оптики.

В общем виде операция линейного кодирования пространственного сигнала (входного изображения) $I_0(\vec{x})$ описывается интегральным преобразованием

$$I_1(\vec{x}') = \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\vec{x}'') G^{\text{КД}}(\vec{x}', \vec{x}'') d\vec{x}'', \quad (2)$$

где $G^{\text{КД}}(\vec{x}', \vec{x}'')$ — функция влияния оптической системы при кодировании.

Выходной сигнал представляет собой пространственное распределение освещенности объекта $F_1(\vec{x})$; функция влияния системы — произведение функций, описывающих распределение прозрачности k апертурных масок [5]

$$G^{\text{КД}}(\vec{x}', \vec{x}'') = \prod_{j=1}^k T_j(\alpha_j \vec{x}' + \beta_j \vec{x}''). \quad (3)$$

Здесь $T_j(\alpha_j \vec{x}' + \beta_j \vec{x}'')$ — распределение прозрачности j -й апертурной маски.

Необходимость использования нескольких масок одновременно будет подробно обсуждаться позже. Сейчас отметим, что при использовании только одной маски заметно уменьшается контраст восстановленного изображения, по сравнению с исходным изображением.

В принятых обозначениях изображение, полученное на выходе кодирующей системы $F_2(\vec{x})$ — распределение освещенности в выходной плоскости, можно описать в форме

$$F_2(\vec{x}) = \varphi \iint_{R^2} F_1(\vec{x}') G^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'') d\vec{x}'', \quad (4)$$

где φ — коэффициент пропорциональности.

Если используется только одна маска ($k=1$), то связь сигналов во входной и выходной плоскостях описывается интегралом свертки

$$F_2(\vec{x}') = \varphi \iint_{R^2} F_1(\vec{x}'') G^{KD}(\vec{x}' - \vec{x}'') d\vec{x}'' = \varphi G^{KD}(\vec{x}') * F_1(\vec{x}'), \quad (5)$$

где $G^{KD}(\vec{x}' - \vec{x}'') = T[\alpha(\vec{x}' - \vec{x}'')]$, $\vec{x}'' = -\frac{\beta}{\alpha} \vec{x}'$. (6)

На фотопластинке, помещенной в выходной плоскости системы, можно записать несколько изображений, каждое из которых формируется с помощью своей отдельной маски (масок), не коррелирующей с масками, с помощью которых записаны другие изображения. Суммарное изображение, полученное в выходной плоскости системы, описывается соотношением

$$F_2(\vec{x}') = \varphi \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'') F_{1i}(\vec{x}'') d\vec{x}'', \quad (7)$$

где $G_i^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'')$ имеет вид (3) или (6).

В рассматриваемой оптической системе были проведены исследования, связанные с выбором транспарантов-масок, задающих функцию влияния системы. В начале сообщения отмечалось, что условием взаимного соответствия операций кодирования и декодирования является равенство свертки соответствующих функций влияния системы дельта-функции

$$\iiint_{R^3} G^{KD}(\vec{x}, \vec{x}') G^{DK}(\vec{x}, \vec{x}'') d\vec{x}' = \delta(\vec{x} - \vec{x}''). \quad (8)$$

Рассмотрим класс функций, удовлетворяющих этому соотношению. Известно, что преобразование Фурье устанавливает взаимно-однозначное соответствие между обобщенными функциями медленного роста [6]:

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}'') = \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 (x_m - x_m'') x_m'} d\vec{x}'. \quad (9)$$

Это соотношение сохраняется при произвольном линейном преобразовании переменных интегрирования

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}'') = \iiint_{R^3} \prod_{m=1}^3 \alpha(\vec{x}, \vec{x}'') \times e^{-2\pi i (\vec{x}_m - x_m'') [\alpha_m(\vec{x}, \vec{x}'', t) x_m' + \beta_m(\vec{x}, \vec{x}'', t)]} d\vec{x}', \quad (10)$$

Разделим подынтегральное выражение на две компоненты; при

$$\alpha_m(\vec{x}, \vec{x}'', t) = \alpha_m(t) \text{ и } \beta_m(\vec{x}, \vec{x}'', t) = \beta_m(\vec{x}, t) + \beta_m(\vec{x}', t) \quad \text{получим}$$

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}'') = \iiint_{R^3} \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} e^{-2\pi i [\alpha_m(t) x_m x_m' + \beta_m(\vec{x}, t) x_m]} \times \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} e^{2\pi i [\alpha_m(t) x_m x_m' + \beta_m(\vec{x}', t) x_m]} d\vec{x}'. \quad (11)$$

Выражение (11) можно обобщить, умножив и разделив под интегралом каждую из компонент на одну и ту же функцию:

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}'') = \iiint_{R^3} \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} a(\vec{x}', t) b(\vec{x}, t) \times e^{-2\pi i \alpha_m(t) x_m x_m' - i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}, t)]} \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} \times [a(\vec{x}', t) b(\vec{x}, t)]^{-1} e^{2\pi i \alpha_m(t) x_m x_m' + i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}'', t)]} d\vec{x}'. \quad (12)$$

Сопоставляя соотношения (6) и (12), можно записать следующие выражения для функций влияния системы, выполняющей операции кодирования и декодирования:

$$G^{\text{КД}}(\vec{x}, \vec{x}', t) = \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} a(\vec{x}', t) b(\vec{x}, t) \times$$

$$\times e^{-2\pi i \alpha_m(t) \vec{x}_m \cdot \vec{x}'_m - i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}, t)]} \quad (13)$$

$$G^{DK}(\vec{x}, \vec{x}', t) = \prod_{m=1}^3 \sqrt{\alpha_m(t)} [a(\vec{x}'', t) b(\vec{x}', t)]^{-1} \times \\ \times e^{2\pi i \alpha_m(t) \vec{x}_m \cdot \vec{x}'_m + i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}'', t)]} \quad (14)$$

Эти формулы являются обобщением ядер известных интегральных голографических кодов [7], включающих преобразования

Фурье и Френеля. В частном случае функции $e^{-i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}, t)]}$ и $e^{i[\mu(\vec{x}', t) + \nu(\vec{x}'', t)]}$ могут быть выборками белого шума, обладающими

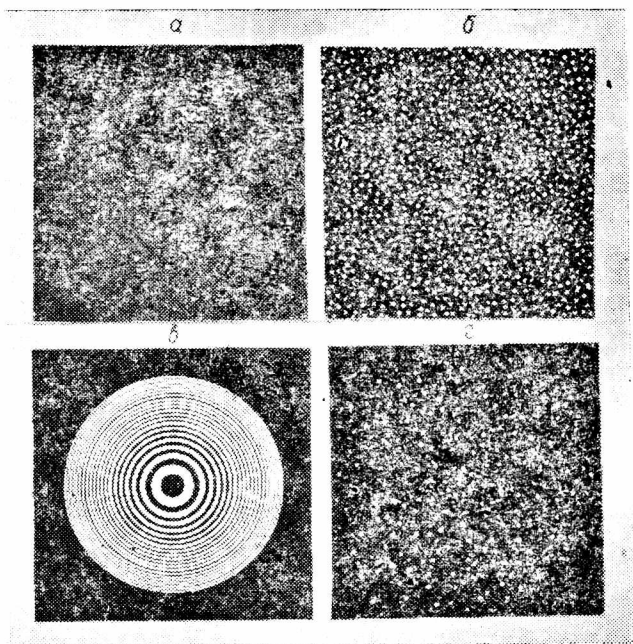
широкой полосой частот. Шумоподобные коды позволяют превратить неоднородные шумы, сопровождающие полезный сигнал, в однородные, которые могут быть подавлены специальными фильтрами. Одновременно полезный сигнал, передаваемый по каналу связи, принимает шумоподобный вид, что способствует его максимальному согласованию с каналом связи [8]. Системы, осуществляющие интегральные преобразования с распределенными ядрами вида (13) и (14), обладают высокой надежностью по отношению к неоднородным шумам в виде очаговых нарушений.

Приведенные преобразования являются лишь формальным основанием выбора формы масок, предназначенных для реализации распределенного квазиголографического кодирования. Однако истинным источником интуитивного выбора необходимых форм масок явились результаты качественных рассуждений о функциональной целесообразности особенностей распространения возбуждения и торможения в многослойных структурах зрительного анализатора.

Рассмотрим некоторые типы масок, которые были использованы в оптической моделирующей системе, и их сравнительную характеристику. Первые опыты на оптической установке были проведены с однослойными масками, представляющими собой систему прозрачных отверстий небольшого диаметра, расположенных на одной или нескольких окружностях определенного радиуса (рисунк, позиция *a*). Такие маски имеют четко выраженный автокорреляционный максимум и были успешно использованы при записи изображений. Основным недостатком их являются большие потери света на маске и необходимость использования очень ярких источников диффузного света.

Следующим типом исследованных масок были шумоподобные маски. Они представляют собой множество произвольным обра-

зом расположенных прозрачных отверстий в плоскости маски, заполняющих значительную часть ее поверхности (рисунок, позиция б). Однако и этот второй тип масок является не очень удобным, так как содержит достаточно большое количество регулярных ансамблей отверстий с различными периодами. Наличие таких



регулярностей приводит к возникновению побочных локальных максимумов автокорреляционной функции маски.

В качестве еще одного типа масок были использованы зонные пластинки Френеля (рисунок, позиция в). И, наконец, маски, представляющие собой «произведение» зонной решетки и шумоподобной маски (рисунок, позиция г). Наилучший результат при записи и восстановлении изображений был получен для масок последнего типа. Более подробно результаты использования различных масок описаны в следующем сообщении настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П. Применение принципов обобщенной голографии к проблеме синтеза образов. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 12, Харьков, 1974, с. 38—46.
2. Оптические модели детекторов признаков зрительных сигналов. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11, Харьков, 1974, с. 40—44. Авт.: Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов.
3. Арбиб М. Мозг, машина и математика, М., «Наука», 1967. 224 с.
4. Виноград С., Коуэн Д. ж. Надежные вычисления при наличии шумов. М., «Наука», 1968. 112 с.