

*БУГАЙ Ю. П.*, канд. техн. наук, *КУМАНИН Ю. А.*

**ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
БИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕРВНЫХ СТРУКТУР.  
СООБЩЕНИЕ 3**

В работе описаны некоторые результаты количественной оценки разрешающей способности и информационной емкости оптической моделирующей системы, предназначенной для избыточного кодирования плоских и пространственных изображений объектов в некогерентном свете. Обсуждаются новые возможности и ограничения метода избыточной записи изображений.

Особенность работы моделирующей системы в режиме кодирования состоит в том, что изображение объекта, освещенного немонахроматическим диффузным светом (или самосветящегося объекта), с помощью кодирующей апертурной маски «расфокусируется» в плоскости записи и регистрируется на фотоленке, а при восстановлении диапозитив полученного промежуточного изображения освещается диффузным немонахроматическим светом и через расфокусирующую апертурную маску «расфокусируется» в выходной области, где происходит восстановление изображения исходного объекта [1].

Под расфокусировкой подразумевается любой используемый способ распределения информации о точечных элементах исходного или промежуточного изображения на область пространства во входной или выходной области. В связи с тем, что в рассматриваемом режиме апертурные маски позволяют реализовать только положительные ядра преобразования, в выходной области вместе с полезными элементами восстановленного изображения объекта появляется фоновая составляющая, уменьшающая контраст восстановленного изображения. Эта особенность преобразований в си-

стеме ограничивает возможности использования ее только для записи изображений, содержащих ограниченное число точечных элементов.

В настоящее время исследуется возможность увеличения разрешающей способности при записи-воспроизведении изображений по предлагаемому методу.

Точная оценка разрешающей способности оптической моделирующей системы для случая небольшого числа отверстий в кодирующей-декодирующей маске была рассмотрена в работе [2]. Однако практический интерес представляют именно маски с максимально возможным числом отверстий для наилучшего использования светового потока, исходящего от объекта, освещенного диффузным немонахроматическим светом. При использовании масок с большим количеством отверстий на единице поверхности, распределенных случайным образом, точное описание преобразований в моделирующей системе не представляется возможным. Дифракция на множестве отверстий (препятствий) одинаковой формы, распределенных случайным образом, рассмотрена и описана только для простейших волновых фронтов (плоского и сферического). Для поставленной цели существенно, что при выполнении необходимых условий (длины волны используемого света значительно меньше диаметра отверстий в масках, расстояния между объектом, маской и экраном невелико) можно пренебречь дифракционными эффектами и пользоваться при качественных расчетах оптико-геометрическими представлениями о распространении света. В настоящем сообщении описаны предварительные результаты качественной и количественной оценки разрешающей способности и информационной емкости оптической моделирующей системы в режиме записи-воспроизведения сигналов.

Для оценки разрешающей способности моделирующей системы целесообразно рассмотреть простейшую задачу записи-воспроизведения точечного изображения в системе ограниченных размеров с одним отверстием в кодирующей-декодирующей маске.

Рассмотрим работу простейшей безлинзовой системы, камеры Обскура, в которой для получения изображения объектов используется небольшое отверстие в непрозрачном тонком экране. В рассматриваемой задаче одна и та же камера используется дважды сначала для записи изображения точечного источника, затем для воспроизведения полученного изображения в той же камере при обратном ходе лучей. Повторное использование маски при обратном ходе лучей в определенном смысле может быть рассмотрено как воспроизведение изображения исходного объекта в том же месте, где находился исходный объект при записи.

### Запись-воспроизведение точечного объекта в однодырочной камере

На рис. 1, *a* схематически показан ход лучей от точечного источника *A* через круглое отверстие  $a_0b_0$  в маске *M* (диаметр  $0l$

верстия равен  $D_0$ ). По мере удаления от маски  $M$  по оси сечения пучка увеличивается. Диаметры сечений пучков в плоскостях  $N_1, N_2, \dots, N_i$  обозначим через  $D_1, D_2, \dots, D_i$  соответственно. Расстояние от плоскости  $L$ , где расположен точечный источник  $A$ , до плоскости  $M$  маски обозначим через  $l$ . Расстояние от плоскости  $M$  до плоскостей  $N_1, N_2, \dots, N_i$  и координаты этих плоскостей в выбранной системе отсчета обозначим через  $z_1, z_2, \dots, z_i$  соответственно.

Первоначально не будем учитывать неравномерность освещенности внутри пучка и изменения освещенности по мере удаления от источника  $A$  вдоль оси  $z$ , так как пока нас интересуют только максимальные геометрические размеры пятна при его преобразованиях. Итак, предположим, что в любой плоскости  $N_1, N_2, \dots, N_i$  изображение источника  $A$  представляет собой равномерно освещенный круг соответствующего диаметра ( $D_1, D_2, \dots, D_i$ ).

Размеры пятна, образованного точечным источником  $A$  (см. рис. 1, а) в произвольной плоскости наблюдения (или регистрации), можно найти из подобия треугольников  $Aa_0b_0$  и  $Aa_i b_i$  ( $a_0 b_0 = D_0$ ), для которых справедливо отношение  $\frac{D_i}{D_0} = \frac{l+z}{l}$ . Из этого отношения получаем для  $D_i$

$$D_i = D_0 + \frac{D_0}{l} z, \quad (10)$$

т. е. размеры пятна увеличиваются по линейному закону в зависимости от величины  $z$ , начиная со значения  $D_0$  (при  $z=0$ ). График зависимости  $D_i(z)$  приведен на рис. 1, б (кривая 1).

На рис. 1, а штриховой линией показан ход лучей от пятна, сформировавшегося в плоскости  $N_i$  (от точечного объекта  $A$ ), в плоскость  $L$ , где находился объект  $A$ . При воспроизведении сформировавшееся при записи пятно рассматривается как исходный объект, освещенный диффузным светом. Максимальные размеры «восстановленного» изображения равны  $ab$  (обозначим диаметр восстановленного пятна  $ab$  через  $D$ ). Величину диаметра  $D$  можно найти, воспользовавшись подобием треугольников  $aBb$  и  $a_i B b_i$ ,  $a_0 B b_0$  и  $a_i B b_i$ , для которых справедливы отношения  $\frac{D}{(l+z_0)} = \frac{D_i}{(z-z_0)}$  и  $\frac{D_0}{z_0} = \frac{D_i}{(z-z_0)}$ . Исключив из двух последних

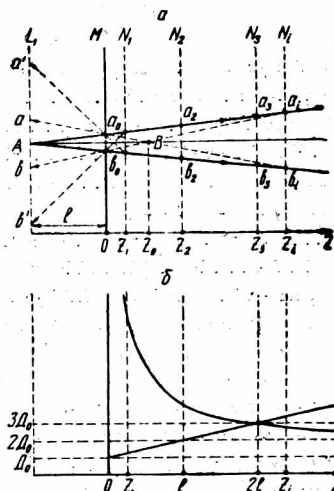


Рис. 1.

равенств  $z_0$ , получим для диаметра пятна  $D$  «восстановленного изображения

$$D = 2D_0 l \frac{1}{z} + 2D_0. \quad (1)$$

График зависимости диаметра пятна восстановленного изображения в зависимости от расстояния  $z$  (т. е. от местоположения плоскости сфотографированного пятна при его воспроизведении) показан на рис. 1 б (кривая 2). Непосредственно из графика и с соответствующего ему аналитического выражения (2) видно, что размеры восстановленного пятна уменьшаются по гиперболическому закону по мере роста  $z$  — местоположения плоскости регистрации точечного изображения  $A$ . При  $z \rightarrow \infty$  размеры восстановленного пятна асимптотически стремятся к определенному значению ( $D_i = 2D_0$ ).

При  $z \rightarrow 0$  пятно при восстановлении размывается до бесконечных размеров. Существует точка  $z = 2l$  (плоскость  $N_3$ ), для которой размеры пятна, получаемого при записи (см. рис. 1, б, кривая 1), равны размерам пятна, получаемого при восстановлении в плоскости  $L$  ( $D_i(z_3) = 3D_0$ ). Расстояние  $z = 2l$  соответствует расстояниям между плоскостями  $L$ ,  $M$  и  $N$  в камере Обскура, при которых линейные размеры изображения, формируемого отверстием, увеличены в два раза по сравнению с размерами исходного изображения. Если  $z < 2l$ , начинает возрастать расфокусировка восстановленного изображения, если  $z > 2l$ , возрастает расфокусировка при записи изображения. И та и другая расфокусировка нежелательна в системе с многодырочной маской, так как приводит к уменьшению информационной емкости системы.

Под информационной емкостью будем подразумевать максимальное число точечных элементов исходного изображения, которое можно записать и восстановить в данной системе.

### К оценке информационной емкости оптической системы

На рис. 2 схематически изображена оптическая моделирующая система. Введем систему координат, плоскость  $XOY$  которой совпадает с плоскостью входного изображения, а ось  $Z$  перпендикулярна к этой плоскости. Размеры системы по осям  $Z$ ,  $X$  и  $Y$  соответственно равны  $z_i$ ,  $d$  и  $q$ . Маска  $M$  расположена на расстоянии от начала координат. Введем обозначения:  $D$  — диаметр отверстия в маске  $M$ :

$\sigma_1$  — среднее количество отверстий на единице поверхности маски;

$\sigma_0$  — среднее количество точек на единице поверхности исходного объекта.

Найдем площадь, занимаемую проекциями отверстий маски в выходной плоскости  $N$  от единственной точки  $A$  входного сигнала (размерами элемента  $A$  пока пренебрегаем). От каждой точки  $A$  входного сигнала из всей маски  $M$  в выходную плоскость

проецируется только соответствующий точке фрагмент 1, 2, 3, 4, остальные лучи не попадают в выходную плоскость системы. Обозначим размеры фрагмента 1, 2 и 3, 4 через  $d_1$ , а размер 2, 3 и 1, 4 — через  $q_1$ . Площадь фрагмента 1, 2, 3, 4 (обозначим ее через  $S_1$ ) равна  $d_1 q_1$ . Из подобия треугольников 5 A 7 и 5' A 7' имеем  $q_1/q = lz_i$  и  $q_1 = ql/z_i$ . Из подобия треугольников 5 A 6 и 5' A 6' запишем  $d_1/d = l/z_i$  и  $d_1 = dl/z_i$ . Окончательно получаем

$$S_1 = d_1/q_1 = qd l^2 / z_i^2. \quad (3)$$

Все пучки лучей, проходящие через фрагмент  $S_1$ , попадут в пределы площади выходной плоскости ( $S = dq$ ). Найдем площадь, покрываемую центральными проекциями отверстий фрагмента  $S_1$  в плоскости  $N$ . Эта площадь (обозначим ее через  $S_n$ ) равна

$$S_n = \sigma_1 S_1 \frac{\pi D_z^2}{4}, \quad (4)$$

где  $D_z$  — диаметр центральной проекции отверстия в плоскости  $Z$ , равный, как следует из соотношения (1),  $D_z = D + \frac{D}{l}(z-l)$ ;  $\sigma_1$  — среднее количество отверстий на единице поверхности маски. После подстановки  $S_1$  и  $D_z$  в соотношение (4) получим

$$S_n = \frac{\pi}{4} \sigma_1 dq D^2. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует интересный вывод: площадь, занимаемая проекциями прозрачных участков используемого отдельной точкой  $A$  фрагмента маски, не зависит от координаты  $z$ , т. е. от местоположения плоскости регистрации, если величина поверхности выходной плоскости остается той же самой ( $S_z = dq$ ).

Введем понятие избыточности сигнала при записи. Определим понятие локальной избыточности при записи (обозначим эту избыточность через  $J$ ) как отношение среднего числа отдельных пятен в выходной плоскости, находящихся на элементарной площадке  $\Delta S$ , к среднему ( $\sigma_0$ ) числу точечных элементов на таком же участке площади во входной плоскости (плоскости исходного сигнала). Среднее число элементов  $\sigma_z$  (пятен) на единице поверхности, возникающее от единственной точки во входной плоскости системы, можно найти из отношения  $n_z/S_z = \sigma_z$ , где  $n_z$  — полное количество пятен в выходной плоскости. Пусть  $n_0$  — число точечных элементов входного сигнала, для величины избыточности окончательно запишем

$$J = \frac{\sigma_z}{\sigma_0} = \frac{\sigma_1 d_1 q_1 n_0}{\sigma_0} = \sigma_1 dq l^2 \frac{1}{z^2}. \quad (6)$$

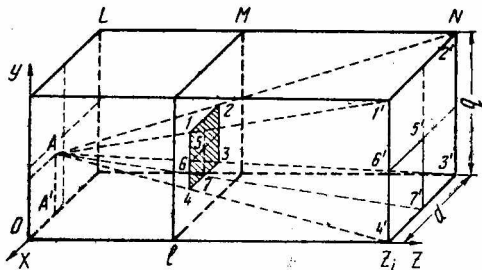


Рис. 2.

Следовательно, избыточность пропорциональна поверхностной плотности прозрачных отверстий в маске и обратнопропорциональна квадрату расстояния от плоскости объекта  $L$  до плоскости регистрации  $N$ .

Полученное для избыточности выражение (6) можно представить в другой полезной форме, если заменить среднее число отверстий на единице поверхности маски отношением полного числа отверстий в маске  $n_M$  к площади маски  $S_M = dq$ :

$$I = n_M l^2 \frac{1}{z^2}. \quad (7)$$

Из соотношения (6) видно, что избыточность может стать равной единице при  $l = z$ , т. е. при этом условии при единственном отверстии в маске исходный точечный элемент, находящийся в любом месте входной плоскости  $L$  (см. рис. 2), будет проецироваться обязательно в какую-либо точку выходной плоскости, удаленной от маски  $M$  на расстояние  $z$ , равное  $l$ . Или протяженный объект, находящийся в плоскости  $L$ , полностью помещается в выходной плоскости. Для  $z > l$  в выходной плоскости, удаленной от маски более, чем на  $l$ , будет помещаться только фрагмент исходного изображения, занимающего всю входную плоскость.

Введем понятие информационной емкости системы при записи для сигнала на входе системы в виде регулярного точечного растра информационной емкостью при записи назовем отношение площади, используемой при записи в выходной плоскости ( $S_z = dq$ ) к суммарной площади световых пятен в выходной плоскости, соответствующей единственному точечному объекту на входе системы

$$S_{\pi} = \sigma_1 S_1 \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{см. соотношение (4)}). \quad \text{Обозначим величину ин}$$

формационной емкости через  $\epsilon$ . Тогда величина информационной емкости при записи может быть выражена через параметры системы следующим образом:

$$\epsilon = \frac{S_z}{S_{\pi}} = \frac{4}{\pi \sigma_1 D^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_1$  — среднее количество отверстий на единице поверхности маски.

Найдем связь между информационной емкостью и избыточностью при записи. Исключив из соотношений (7) и (8)  $\sigma_1$ , имеем

$$\epsilon = \frac{4dq l^2}{\pi l z^2}. \quad (9)$$

Таким образом, информационная емкость системы при записи обратно пропорциональна избыточности и квадрату расстояния плоскости регистрации от плоскости, в которой расположена маска  $M$ , т. е. из-за того, что при росте  $z$  увеличиваются размеры пятен от каждой точки входного сигнала, уменьшается число пятен в изображении, которые еще можно записать без наложения дру

на друга. Полученное значение информационной емкости оказывается сильно заниженным по сравнению с тем, которое получено в эксперименте, так как исходное изображение восстанавливается и при многократном наложении проекций входных точечных элементов, возникающих в выходной плоскости.

Значительное увеличение информационной емкости системы может быть получено при использовании комбинации линзы и одной или нескольких апертурных масок. Система, содержащая линзы, позволяет осуществить преобразования входного сигнала, в функциональном отношении подобные тем, которые осуществляются в голографическом устройстве с опорным источником света. Подробнее такая система будет рассмотрена в следующих сообщениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П., Червов В. Г. Об одном методе записи-восстановления изображений в некогерентном свете при использовании опорного предмета. — Всесоюзная научно-техническая конференция «Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстротекущих процессов». Тезисы докладов. М., 1972, с. 123—124.
2. Оптическая система для исследования биогографических моделей нервной системы. Сообщение 2. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1975, с. 74—78. Авт.: В. А. Бахтигозин, Ю. П. Бугай, Ю. А. Куманин, В. Г. Червов.