

07

## Особенности представления информационного содержания голограмм через количество оптических степеней свободы

© С.Б. Гуревич, Б.С. Гуревич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
ЗАО „Научные приборы“, Санкт-Петербург  
E-mail: sbgurevich@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 февраля 2012 г.

Проанализированы особенности оценки количества оптических степеней свободы в случае мультиплексной голографической записи информации. Отмечаются необходимость учета трех видов пространственных степеней свободы в среде для записи голограмм. Указывается на приоритет свойств записывающей объемной среды при оценке предельного числа степеней свободы. Принципиально возможно создание записывающей среды и методов записи на нее, когда число степеней свободы может быть больше, чем определяемое формулой Ван Хирдена. При оценке числа степеней свободы должно быть также учтено, что при голографической записи нет возможности получения значений сигналов полностью независимых от значений в другом интервале.

Для определения информационных характеристик голографических систем эффективным является метод, основанный на оценке числа степеней свободы оптического сигнала, определяемого  $N$  независимыми значениями сигналов в конечном интервале оценок. Величина сигнала может быть различной для различных пространственных точек  $x, y, z$ , временных интервалов  $t$ , длин волн света, состояний поляризации, а при голографической записи различной в зависимости от начального распределения фаз. Соответственно в число  $N$  должно входить несколько составляющих, определяющих виды передаваемой информации. В отличие от оптических устройств, передающих изображение как распределение интенсивностей, голографическая система позволяет непосредственно передавать фазовую информацию и осуществлять наложение волновых фронтов от разных объектов.

Это делает систему информационно более содержательной, чем обычная оптическая система, но и более сложной. Поэтому она обладает большим количеством источников потерь информации [1]. Наиболее важную роль играет пространственная информация (которую иногда оценивают разрешающей способностью), поскольку голография отличается двуступенчатостью процесса, одной из ступеней которого является пространственная запись волнового фронта. Однако различные механизмы записи волновых фронтов и восстановления изображения объектов позволяют пространственные степени свободы взаимно обменивать как на временные, так и на другие степени свободы.

Фактически объем информации  $L$  определяется выражением [2]

$$I = \sum_{i=1}^N \log_2(m_i + 1), \quad (1)$$

где  $N$  — общее число элементов и интервалов, в которых величины сигналов независимы,  $m_i$  — число градаций, которые могут быть различены в сигнале в данном элементе.

При одинаковом числе градаций в каждом из видов световой информации выражение (1) преобразуется в более простое:

$$I = N \log_2(m + 1), \quad (2)$$

однако, как правило, в различных видах информации может быть различное число  $m$  [3].

Для голографических систем важное значение имеют среды для записи и хранения голограмм (в которых существенную роль играет их мультиплексирование), а также выбор способов дискретизации для различных видов информации.

Голографическая среда позволяет записывать множество голограмм как на различных ее участках, так и на одном и том же (мультиплексирование). В наборе голограмм, имеющемся в записываемой среде, появляется большее число степеней свободы и хранится объем информации, существенно больший, чем объем, получаемый при единичных записи и восстановлении.

Голограмму можно рассматривать как суперпозицию элементарных голограмм отдельных точечных источников (пикселей), составляющих объект. Для оценки числа оптических степеней свободы важно, чтобы

каждая из этих голограмм точек объекта действовала бы независимо от голограмм других точек объекта. Такое представление не является точным. С одной стороны, оно не учитывает интерференции каждой точки объекта со всеми другими точками, хотя обычно результатом такой интерференции можно пренебречь, так как дифрагированный в результате такого взаимодействия свет обычно попадает за пределы восстанавливаемого изображения. Другая причина неточности заключается в том, что выбор такого размера пиксела, чтоб сигнал одного не смешивался с сигналом другого, может быть осуществлена только приближенно. Также взаимодействие более далеких друг от друга элементов (например, рассеяние) может влиять на неполную независимость сигналов от разных пикселов. Если считать, что сигнал от каждого пиксела независим от сигнала от другого, то существует  $N_p$  степеней свободы с величиной сигнала распространенного вдоль поверхности среды в виде решеток с переменной частотой. Голограмма представляет собой сумму таких решеток, независимо друг от друга отклоняющихся при восстановлении проходящий опорный пучок. Если дискретизация на объекте выражается в разделении на число пикселов, то в голограмме дискретизация выражается в разделении на число элементарных решеток, каждая из которых с заданным опорным пучком отправляет элементарный сигнал в нужном направлении.

Приведенные соображения демонстрируют превращение локализованного (точечного) сигнала в объекте в протяженный сигнал в голограмме. Это дает голографическому методу ряд преимуществ.

Звено хранения может представлять собой сложную систему включающую набор голограмм  $N_H = N_s N_M$ , как распределенных по поверхности (их число равно  $N_s$ ), так и наложенных друг на друга ( $N_M$ ). Каждая голограмма хранит в себе набор полутоновых пикселов с информационной емкостью  $I_{im} = N_p \log_2(m + 1)$ , соответственно полная информационная емкость может быть представлена как  $I = N_s N_M N_p \log_2(m + 1)$ .

Так как сигналы в каждой голограмме и каждом пикселе должны быть независимы, то число степеней свободы  $S$  в среде с записанным набором голограмм равно

$$S = N_s N_M N_p. \quad (3)$$

Однако если степени свободы  $N_s$  расположены на разных участках среды и являются локализованными, то степени свободы  $N_M N_p$

определяются сигналами, распределенными по поверхности каждого из  $N_s$  участков. При этом число степеней свободы  $N_M$  может быть оценено по числу записей, произведенных независимыми методами мультиплексирования, и может состоять из нескольких множителей, каждый из которых соответствует своему виду мультиплексирования.

Для того чтобы получить не перекрытые изображения объектов, необходимо, чтобы восстанавливающие волновые фронты пучки создавали исходные изображения в различных участках пространства или в разные моменты времени. Кроме того, возможно восстанавливать изображения опорными пучками, модулируемыми различным образом.

Необходимо также, чтобы запись могла происходить от объектов, расположенных в одном и том же месте. При этом опорный пучок должен быть по ориентации или по содержанию изменен в соответствии с условиями записи, а изображение могло проецироваться на одно и то же место, не будучи перекрытым посторонними изображениями или данными. Кроме того, определенная страница данных должна восстанавливаться единственно возможным восстанавливающим пучком. Таким образом, задача методов мультиплексирования — создать набор волновых фронтов, от которых на детекторные приемники матрицы падает изображение только одного объекта.

Эти методы могут разделяться на два общих класса.

Считывание с пространственным выделением. Восстанавливающим опорным пучком возбуждаются волновые фронты более чем от одной голограммы. Тем не менее, эти волновые фронты не перекрываются в пространственных частотах, поэтому одна реконструкция может быть воспроизведена только с помощью диафрагмы. Искомые данные затем попадают на детекторный массив. Такой способ служит основой для фрактального и перистрофического мультиплексирований.

Считывание с брэгговским согласованием. Восстанавливается только тот волновой фронт, который при освещении голограммы заданным опорным пучком, удовлетворяет условию Брэгга. Все другие хранимые голограммы подавляются несогласованием. Очевидно, что такие методы непригодны для тонких голограмм. Эти методы включают мультиплексирование угловое, по длине волны, фазовокодированное и сдвиговое.

На основе механизмов пространственного выделения и удовлетворения условию брэгговского согласования можно сформировать целый набор методов мультиплексирования. Можно одновременно применять несколько различных методов мультиплексирования. Общее число сте-

пеней свободы при применении нескольких видов мультиплексирования равно сумме степеней свободы каждого вида

$$N_M = \sum N_{M_i}. \quad (4)$$

Среди них могут быть комбинации с использованием методов как с пространственным выделением, так и с брэгговской селективностью.

Определение общего числа оптических степеней свободы при голографической записи в соответствии с (3) сводится к определению числа степеней свободы  $N_p$ ,  $N_s$  и  $N_M$ . Подход к их определению может быть разным. Величина  $N_p$  может зависеть от максимальной дискретизации светового поля объекта, достаточной для получения нужной информации об объекте. Размер пространственного интервала ( $a$  и им при заданных размерах объекта определяется число пикселей в объекте) следует устанавливать таким, чтобы он был не больше допустимой величины, определяемой пространственным дифракционным пределом.

Величина  $N_s$  зависит от числа голограмм, вмещающихся в размер рабочего участка среды записи, тогда как минимальные размеры голограммы зависят от количества  $N_p$ . Сложнее определить  $N_M$  — оно соответствует общему числу накладываемых голограмм с различными способами мультиплексирования. Число предельных степеней свободы для каждого из них может быть различным. Имеется опыт суммарного мультиплексирования голограмм различного вида, оно достаточно велико. Так, при использовании фрактального мультиплексирования вместе с поперечным угловым, удалось записать до 10 000 голограмм на одном участке среды и продемонстрировать поверхностную плотность информации порядка 400 bit/ $\mu\text{m}$  [4].

Предельная степень дискретизации, определяющая максимальное число степеней свободы, вытекает из дифракционного предела передачи пространственной информации, связанного с размером апертуры, через которую эта информация проходит.

Ограничения, вводимые при восстановлении изображения на матрице фотоприемников, определяются величиной порядка  $10^9$  bit/cm<sup>2</sup>. При последовательном наложении голограмм плотность информации, записанной в голографической среде, может быть значительно больше. Это относится и к объемным голограммам. Известно, что Ван Хирден [5] определил величину предельной емкости информации для этого случая, как  $I_{3D} = (V/\lambda^3) \log_2 \psi$ , где  $V$  — объем записываемой среды.

При длине волны  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  плотность записанной информации оказывается равной  $10^{13} \text{ bit/cm}^3$ . Число степеней свободы при этом равно  $V/\lambda^3$ . В действительности эта оценка не является справедливой. При последовательном наложении голограмм дифракционное ограничение происходит только при разовом введении части информации, в то время как количество мультиплексий ограничивается не дифракцией, а разрешением среды записи и динамическим диапазоном сигнала, возникшего под действием света. Для дифракционного предела максимальное число степеней свободы единичной голограммы будет иметь вид  $I_{2D} \approx (S/\lambda^2)$ .  $I_{3D}$  отличается от  $I_{2D}$  на величину  $d/\lambda$  восстановления (где  $d = V/S$ ). Применение этого множителя с оговорками возможно лишь при непосредственном одноразовом восстановлении всего объема записанной информации [2].

При мультиплексировании имеет место многократное восстановление от многих голограмм, записанных на одном и том же участке. При этом емкость восстановленных голограмм и число их степеней свободы складываются арифметически (как в случае синтезированной апертуры). В результате могла бы быть достигнута емкость, превышающая величину, определенную по формуле Ван Хирдена [5], если бы не существовали ограничения, вызванные свойствам записывающей среды, прежде всего ее разрешающей способностью.

Другими ограничивающими факторами являются шумы и динамический диапазон среды, на которой записывается совокупность голограмм, а также рассеяние, в результате которого сигналы, относящиеся к различным участкам и интервалам, оказываются не полностью независимыми.

## Список литературы

- [1] Gurevich S.B., Gurevich B.S., Jumaliev K.M. // Proceedings of SPIE. 2008. V. 7142. P. 71420Y-1.
- [2] Гуревич С.Б., Гуревич Б.С., Жумалиев К.М. Проблемы информационной оптоэлектроники. СПб.: Наука, 2008. 209 с.
- [3] Гуревич С.Б. Голографические запоминающие устройства // Большая Российская Энциклопедия. 2007. Т. 7. С. 451.
- [4] Burr G.W., Jefferson C.M. et al. // Opt. Lett. 2001. V. 26. N 7. P. 444.
- [5] Van Heerden P.J. // Appl. Opt. 1963. V. 2. P. 387.