

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОПТИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© 2008 г. **Б. С. Гуревич***, доктор техн. наук; **С. Б. Гуревич****, доктор физ.-мат. наук;
К. М. Жумалиев***, доктор техн. наук

* ОАО “Научные приборы”, Санкт-Петербург

** Физико-технический институт РАН, Санкт-Петербург

*** Институт физики НАН Республики Кыргызстан, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: bgurevich@mail.ru

Развитие оптических информационных технологий приводит к необходимости использования информационных характеристик для описания оптических и оптоэлектронных устройств. Для получения информационных характеристик необходимо воспользоваться традиционными оптическими характеристиками и установить их взаимосвязь. Перевод оптических характеристик в информационные предлагается осуществить, используя частотно-градационные характеристики, полученные на основе дискретизации оптического поля и оптического сигнала.

Коды OCIS: 070.4560.

Поступила в редакцию 23.08.2007.

Введение

Применение теории информации к оптике создает новый раздел последней – информационную оптику. Информационная оптика описывает передачу информации светом, осуществляемую светоинформационными системами. В связи с развитием информационных технологий и использованием в них оптических сред и приборов информационная оптика – раздел оптики, исследующий информационные процессы в оптических системах, – является весьма актуальной.

Светоинформационные устройства были созданы задолго до появления теории информации, и их свойства описывались привычными оптическими характеристиками. Однако эти характеристики были недостаточны для определения информационных возможностей таких устройств и появилась потребность в использовании специфических информационных характеристик, которую оказалось возможным реализовать в результате применения теории информации.

В отличие от аналоговых оптических характеристик информационные характеристики являются дискретными, цифровыми. Эти цифровые характеристики необходимо связать с измеряемыми аналоговыми оптическими характеристиками, что позволит проводить исследования протекания информационных процессов в оптических системах, но для этого надо решить ряд проблем. В первую очередь должна быть решена проблема дискретизации оп-

тических полей и оптических сигналов. Далее необходимо выбрать такие аналоговые характеристики, которые после преобразования позволяют получить необходимые цифровые информационные характеристики. Для определения информационных характеристик должны были быть использованы такие привычные оптические характеристики, как амплитуда и фаза оптического сигнала, распределения сигнала по пространственным частотам, длинам волн или по цветовым составляющим; распределение сигнала по плоскостям поляризации; распределение сигнала по интервалам времени и время кадра.

Дискретность информационных характеристик

Получение информации о некотором состоянии может быть представлено в виде опыта, который имеет один из m исходов, причем вероятности появления каждого из них равны соответственно $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$. Характеристика неопределенности, имевшей место до проведения опыта, может быть дана с помощью некоторой величины

$$H = -\sum_{i=1}^k p_i \log p_i,$$

которую Шеннон назвал энтропией совокупности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$.

Если в результате опыта получен определенный результат, то неопределенность исчезает и количе-

ство информации I равно энтропии H . При равновероятности появления каждого из состояний и принятия для удобства двоичных единиц можно написать $I = H = \log_2 k$. Если независимо проводится серия N опытов, то суммарная информация равна сумме информации от каждого опыта. Независимость опытов предусматривает независимость вероятностей каждого из исходов в разных опытах, а в некоторых случаях и числа исходов. В теории связи под числом опытов понимается число временных интервалов, в каждом из которых определяется знак, входящий в сообщение. В применении к оптике под числом опытов понимается число интервалов или элементов (двухмерных или многомерных), в которых определяются одно из возможных m значений оптического сигнала. Для k и N не может быть дробных значений, и, соответственно, оценка количества информации в теории информации базируется на целых числах дискретных значений сигнала и интервалов (или элементов).

В системах связи определенный класс сообщений в общем виде можно представить состоящим из N независимых опытов (интервалов), каждый из которых дает в результате его проведения одно из m фиксированных состояний, кроме нулевого. При равновероятности каждого состояния и проведении N опытов (на каждом из независимых интервалов) количество информации может быть определено в принятых двоичных единицах как $I = N \log_2 k$. В действительности величина, характеризующая состояние (сигнал) может изменяться непрерывно и может не быть целым числом. В этом случае нужно провести дискретизацию сигнала, определив в нем m целочисленных состояний (рис. 1). При этом $k = m + 1$, так как к числу m целых значений сигнала добавляется нулевое значение. Дискретизация мотивируется еще и тем, что на самом деле из-за флуктуаций точно определить сигнал по данному измерению нельзя. Учет шумов может служить ос-

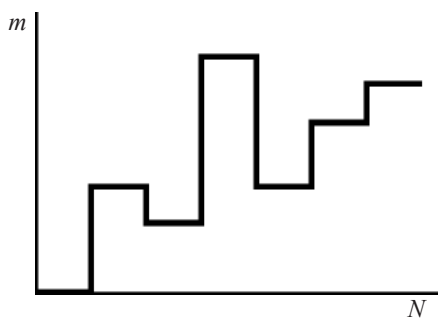


Рис. 1. Дискретное представление произвольного сигнала.

новой для получения m состояний (кроме нулевого). Эта дискретизация может быть осуществлена одинаково для каждого опыта (интервала).

При определении числа независимых элементов задача здесь состоит в определении целого числа интервалов полного сообщения, в каждом из которых определяется значение сигнала. Такую задачу для дискретизации функции в определенном отрезке на целое число значений решал Шеннон. В теории связи основой для такой дискретизации временного распределения сигнала служила теорема выборки Уиттекера–Котельникова–Шеннона [1], согласно которой при ограниченной полосе частот Δf всю функцию зависимости сигнала от частоты можно было определить N значениями, характеризующими сигнал в интервалах $\Delta t = 1/2\Delta f$. Значение сигнала в каждом интервале дискретизируется с учетом шумов.

Приложения положений теории информации к оптическим системам

Значительные успехи применения теории информации в технике связи сразу же навели на мысль о полезности применения этой теории к оптике, поскольку свет является мощным источником информации, а большинство оптических приборов предназначены для получения информации. Первой, хотя и не единственной проблемой, возникшей в информационной оптике, явилась дискретизация светового поля и светового сигнала, переносящего информацию об изображении объекта. В световом поле, где световой сигнал зависел от многих величин, дискретизация должна проводиться не по одной, а по нескольким компонентам и вместе с временными частотами должны быть использованы пространственные частоты [2]. Для дискретизации светового поля в работах Торальдо ди Франча [3, 4] и Габора [5] была предложена концепция “степеней свободы”. Отмечая, что минимальное число реальных параметров, необходимое для полного определения системы, обычно называют числом степеней свободы, Торальдо ввел термин степени свободы изображения. Число последних определялось числом значений сигнала, характеризующим его распределение в дискретизированном световом поле. При этом изменение сигнала в некотором определенном параметре M_i (одной степени свободы) никак не должно влиять на сигнал в другом параметре M_j (другой степени свободы). При расчете числа степеней свободы полоса пространственных частот чаще всего ограничивалась дифракцией на апертуре объектива, формирующего изображение. Это давало возможность определять число параметров, описывающих функцию значений сигнала по тео-

реме выборки. Однако дискретизация сигнала не рассматривалась и не учитывался объем информации, содержащейся при получении конкретного значения сигнала. В работах по определению информационной емкости ряда светоинформационных систем С.Б. Гуревич [6, 7] провел дискретизацию сигнала в каждом отдельном отсчете, увязав ее с межградационными шумами и вероятностью обнаружения необходимого порогового или градационного сигнала. Им же разработана концепция оценки потерь объема прошедшей информации в многозвенных и многоканальных светоинформационных системах из-за увеличения шумов при переходе от одного звена к другому, а также информационного несогласования различных звеньев и других причин; рассмотрены особенности преобразования временной информации в пространственную и наоборот и взаимное преобразование других компонентов информации. Для пространственной дискретизации им использовались системные факторы.

При оценке предельного разрешения, определяемого дифракцией, отмечалось, что, используя метод аналитического продолжения, можно получить разрешающую способность, сколь угодно превышающую критерий Рэлея [2, 3]. В действительности некоторое превышение этого критерия можно получить по ряду причин, но получить точное значение функции на всех пространственных частотах нельзя вследствие статистических ограничений и, в частности, из-за погрешности измерений. Вместе с тем Лукаш показал [8], что за счет уменьшения временных и других непространственных степеней свободы можно получить большее число пространственных интервалов с различными значениями сигналов, чем определяемое только пространственными степенями свободы. Перечисленными работами, а также работами А.Л. Микаэляна [9] и других авторов заложены основы информационной оптики. В более поздних работах исследованы информационные процессы в голографических системах, акустооптических устройствах, пространственных модуляторах света, в средах для записи и хранения информации, в ряде оптических и оптоэлектронных систем и в отдельных приборах [10–12].

Дискретизация светового сигнала и светового поля

Однако для развития информационной оптики требуется более точно определить методы дискретизации светового сигнала и светового поля.

В каждом элементе оптический сигнал дискретизируется на m уровней. Рассмотрим, как осуществляется эта дискретизация.

Информационные процессы зависят от особенностей прохождения через систему сигнала, переносящего информацию, и в первую очередь от изменения в ней отношения сигнал/шум. При этом важно знать пороговое значение сигнала, когда обеспечивается $S/S_{\text{ш}} = \Psi = K$, где K – отношение сигнал/шум, при котором минимальный сигнал обнаруживается в шумах с достаточно высокой наперед заданной надежностью. В случае систем с бинарными сигналами этого знания достаточно. Однако в случае аналоговой системы количество информации связано с отношением сигнал/шум через число надежно различимых интервалов сигнала (число градаций) m (см. рис. 1). Можно показать [7], что для систем, в которых нет источников шумов, не связанных с сигналом, число градаций m , различимых на выходе,

$$m_{\text{вых}} \approx \Psi_{\text{вых}} \sqrt{2/K}. \quad (1)$$

В случае, когда источники шумов полностью независимы от источников сигнала, шум остается неизменным при любом значении сигнала. Тогда различимая разность сигналов, соответствующая одной градации (при приблизительном равенстве шумов)

$$\Delta S = K \sqrt{S_{\text{ш}1}^2 + S_{\text{ш}2}^2} = \sqrt{2K} S_{\text{ш}}$$

и для $m_{\text{вых}}$ получим

$$m_{\text{вых}} \approx \Psi / \sqrt{2K}. \quad (2)$$

В промежуточных случаях шумы частично зависят от сигнала. Коэффициент пропорциональности между m и Ψ будет принимать значения между 1,41 и 0,71 K .

Таким образом, для отдельного канала (по другой терминологии – для одной степени свободы) информационную емкость можно представить как

$$I = \log_2(m + 1) = \log_2(\delta K \Psi + 1), \quad (3)$$

где δ – величина со значением от 0,7 до 1,4 в зависимости от характера шумов. Из сказанного следует, что дискретизация по отношению сигнал/шум и получение значения m в определенной степени зависят от требований, предъявляемых к системе воспроизведения световой информации.

Пространственная дискретизация светового поля может базироваться на разных принципах. В основу одного из них входило детерминистское разделение, определяемое точно рассчитываемыми явлениями, например, дифракцией [3]. Хотя такая дискретизация направлена на получение максимального числа участков, в которых могут быть получены независимые значения сигналов, она связана с характеристиками приборов, в частности, с размером входного зрачка прибора. Фурье-образ $F(\omega)$ объек-

тной функции $f(x)$ ограничен в зрачковой области частотами Ω . Для пространственно ограниченного объекта в области $-X/2 < x < X/2$ функция может быть определена выражением

$$f'(x) = \int_{-X/2}^{X/2} \frac{\sin \Omega(x-s)}{\pi(x-s)} f(s) ds \quad (4)$$

и в соответствии с теоремой выборки может быть полностью определена суммой членов

$$f(x) = \sum_{i=1}^S \psi_i(x) a_i(x),$$

где $\psi_i = \sin \Omega(x-s)/\pi(x-s)$, а число интервалов

$$S = X\Omega/\pi. \quad (5)$$

Величина S (число степеней свободы, названное Торальдо числом Шеннона) здесь оценивалась для случая, когда частотные характеристики имеют крутой или близкий к нему обрыв (рис. 2, линия 1). В действительности наиболее часто такие характеристики имеют пологий спад от максимального значения до нулевого и выбор критической частоты зависит от установленной вероятности обнаружения на этой частоте сигнала в шумах. При пологом уменьшении сигнала с частотой высокочастотная информация передается с дополнительной потерей числа различных градаций в шумах (рис. 2, линия 2). Очень часто в этом случае бывает трудно установить критическую частоту, после которой $m = 0$. Точные информационные величины в битах могут быть представлены лишь в искусственном случае передачи набора точек с бинарными значениями сигналов. В реальных изображениях, когда необходимо осуществлять дискретизацию сигнала помимо координатных, временных и других параметров светового поля, приходится иметь дело с более условными информационными единицами, которые определяются заданными параметрами дискретизации.

В основу другого метода дискретизации светового поля входил недетерминистский, статистический

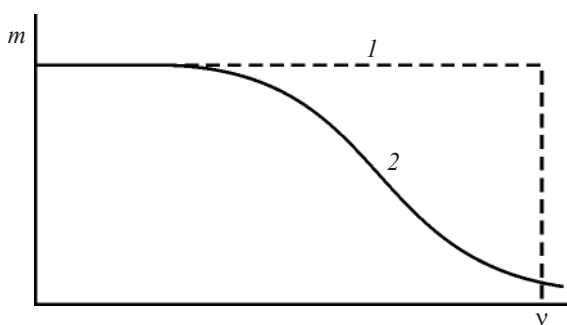


Рис. 2. Потери градаций на высоких пространственных частотах. Пояснения см. в тексте.

кий способ. Если при детерминистическом описании предполагается, что имеются все данные для точного предсказания хода процесса и при повторном воспроизведении того же процесса будет получена та же зависимость его прохождения, то в случае, когда процессы не могут быть в точности повторены, как, например, при описании броуновского движения, приходится обращаться к статистическому описанию. Волновой фронт при повторной его реализации в тех же условиях отличается от имевшего место в первой реализации, и это отличие будет выражаться в нетождественности распределения не только амплитуд, но и фаз. Вследствие этого будут флуктуировать не только интенсивности, но и направления распространения участков волнового фронта. Результатом учета пространственных флуктуаций фаз будет расширение участка неопределенности, что наряду с расфокусировкой, вызванной дифракцией, приведет к расширению площади, в которой нельзя определить, от какой точки объекта в данную точку записи пришел луч.

В основу третьего способа входили системные ограничения, связанные с техническими возможностями системы. Например, в случае телевизионных систем разделение светового поля на элементы определялось полосой частот канала и некоторыми другими параметрами системы. В других случаях системные ограничения устанавливались эмпирически [6, 7]. Для различных светоинформационных систем должны быть найдены свои оптимальные решения.

Во всех случаях перед дискретизацией ставилась цель получения числа участков N , в каждом из которых сигнал независим или мало зависим от влияния сигнала других участков.

В каждом из независимых интервалов сигнал дискретизируется на m уровней, и тогда, общий объем информации при независимости числа градаций от частоты

$$I = M \log_2(m+1). \quad (6)$$

В реальных оптических системах такая зависимость может существовать и поэтому должна быть принята во внимание.

Частотно-градационные характеристики и переход от чисто оптических характеристик к информационно-оптическим

Для информационных оценок оптических систем необходимо осуществить переход от чисто оптических характеристик к информационно-оптическим. Здесь играют существенную роль частотно-градационные характеристики (ЧГХ) для пространственных частот по x , y и временных частот. В этих ха-

раактеристиках должны быть учтены как амплитудные, так и фазовые флуктуации.

Важной оптической характеристикой передачи системой пространственной информации является передаточная функция. Фурье-преобразование импульсного отклика системы $h(x, y)$ (функции распространения точки) дает функцию $H(u, v)$, которая и есть передаточная функция. Она может быть различной для когерентной и некогерентной оптических систем. В первом случае она характеризует частотную зависимость комплексной амплитуды поля и имеется в виду, что система линейна относительно этой амплитуды. Во втором случае характеризуется частотная зависимость интенсивности и такая функция определяется как оптическая передаточная функция [2]. Абсолютные значения этой функции образуют частотно-контрастную характеристику (ЧКХ). Последнюю можно получить с помощью тест-объектов, пространственное распределение прозрачности которых было бы представлено в виде синусоид с различными периодами.

ЧКХ является важнейшим инструментом в определении пространственных потерь информации, однако в большинстве случаев одна она не может служить этой цели. Для количественной оценки пространственных потерь следует еще учесть шумы и построить зависимость отношения сигнал/шум от пространственной частоты, или (учитывая, что отношение сигнал/шум определяет число различимых градаций) зависимость числа градаций от пространственной частоты. Такая ЧГХ [7] уже определяет и количество передаваемой, и количество теряемой информации. Определим связь между пространственными частотами v_x и v_y , для чего определим число элементов Ω как произведение полупериодов, укладывающихся в единицу площади, для изотропного случая, когда частоты по x и y одинаковы. Тогда число полупериодов составит $v_x v_y / 4 = \Omega$. На рис. 3 приведена зависимость числа градаций m от Ω (ЧГХ). Связь между ЧКХ и ЧГХ наиболее проста в том случае, когда шумы не зависят от сигнала и их спектральная плотность не изменяется с пространственной частотой. При этом отношение сигнал/шум и градации изменяются с частотой так же, как сигнал и контраст, и в результате относительные ЧГХ и ЧКХ совпадут. Во всех других случаях эти характеристики будут различаться.

В этом более общем случае зависимость числа градаций m от частоты Ω будет выражаться через отношение сигнал/шум следующим образом

$$m(\Omega) = [1/k(S)][S(\Omega)/S_{\text{ш}}(\Omega)] = [1/k(S)]\Psi(\Omega). \quad (7)$$

Если $k = \text{const}$, то ЧГХ совпадают с сигнально-частотными характеристиками. В общем случае приходится учитывать зависимости $S_{\text{ш}}(\Omega)$ и $k(S)$.

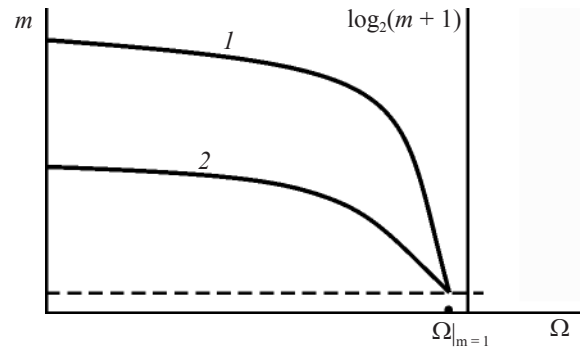


Рис. 3. Зависимости числа различимых градаций m (1) и количества информации $\log_2(m+1)$ (2) от плотности элементов изображения.

Оценим далее плотность информационной емкости оптической системы с ЧГХ $m(\Omega)$. Для удобства рассмотрения положим $m(\Omega) = m_0 \delta(\Omega)$, где $\delta(\Omega) = m/m_0$, а m_0 – число градаций на низких частотах. Теорему выборки применяют при зависимости $m(\Omega)$, представленной на рис. 3 линией 1 или близкой к ней, т. е. при удовлетворении условий

$$\begin{aligned} \delta(\Omega) &= 1 \text{ при } 0 < \Omega < \Omega_{\text{lim}}, \\ \delta(\Omega) &= 0 \text{ при } \Omega > \Omega_{\text{lim}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где Ω_{lim} определяется значением Ω , при котором $m = 1$, и выше которого $m = 0$.

При этом информационная плотность

$$I' = \Omega_{\text{lim}} \log_2(m_0 + 1). \quad (9)$$

В действительности в реальной системе информационная плотность будет меньше, так как будет потеряна часть градаций при передаче высококачественной составляющей информации. В реальной системе информационная плотность должна определяться исходя из характеристики, приведенной на рис. 3. Здесь же приведена зависимость величины $\log_2(m+1)$ от Ω в пределах от $\Omega = 1$ до $\Omega = \Omega_{\text{lim}}$. При малом изменении пространственной частоты от Ω_{i-1} до Ω_i значение функции $\log_2[m(\Omega) + 1]$ практически не изменяется и плотность информации для этого интервала частот можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_{\Omega_i} - I_{\Omega_{i-1}} = \Omega_i \log_2[m_i(\Omega) + 1] - \\ &- \Omega_{i-1} \log_2[m_{i-1}(\Omega) + 1] = \Delta \Omega_i \log_2[m_i(\Omega) + 1], \end{aligned} \quad (10)$$

в пределах изменения частоты от $\Omega = 1$ до $\Omega = \Omega_{\text{lim}}$ информационная плотность составит

$$I_{\text{lim}} = \sum_{i=1}^{\Omega_{\text{lim}}} \Delta I_{\Omega_i} = \Delta \Omega \sum_{i=1}^{\Omega_{\text{lim}}} \log_2[m_i(\Omega) + 1]. \quad (11)$$

Разность величин, определяемых выражениями (9) и (11), определяет потери информации, обусловленные непрямоугольной частотной зависимостью $m(\Omega)$ [13]. Для дискретизации светового поля важно определение величины Ω_{lim} , зависящей от многих факторов, в том числе, от отношения сигнал/шум и требуемой надежности определения светового сигнала.

Заключение

Для информационных оценок оптических систем необходимо сформировать информационно-оптические характеристики. В них должны быть учтены как амплитудные, так и фазовые флуктуации. Здесь важную роль играет кривая, характеризующая зависимость отношения сигнал/шум от пространственной частоты, или, учитывая, что отношение сигнал/шум определяет число различимых градаций, – зависимость числа градаций от пространственной частоты. Такая частотно-градационная характеристика определяет количество передаваемой информации, так как она оперирует величинами, входящими в основу количественной оценки информации.

В основе информационных оценок лежит возможность дискретизации сигналов и дискретизация светового поля. Последняя может осуществляться исходя из различных предпосылок. В основу одной из них входило детерминистское разделение, определяемое рассчитываемыми явлениями, например, дифракцией. Хотя такая дискретизация направлена на получение максимального числа независимых интервалов, она остается зависимой от характеристик приборов, используемых в светоинформационных системах, в частности, от зрачка прибора. В основу другого метода дискретизации светового поля входил недетерминистский, статистический способ. Волновой фронт при повторной его реализации в тех же условиях отличается от имевшего место в первой реализации, и это отличие будет выражаться в флуктуации не только интенсивности, но и на-

правления распространения участков волнового фронта. В основу третьего способа входили системные ограничения, связанные с техническими возможностями системы. В некоторых случаях системные ограничения не могли быть рассчитаны и устанавливались эмпирически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
3. Toraldo di Francia G. Resolving power and information // JOSA. 1955. V. 45. № 7. P. 497–501.
4. Toraldo di Francia G. Degrees of freedom of an image // JOSA. 1969. V. 59. № 7. P. 799–804.
5. Gabor D. Light and information // Progress in Optics / Ed. Wolf E. V. 1. Amsterdam. North-Holland, 1961. P. 109–153.
6. Гуревич С.Б. Информационный подход к оценке чувствительности в фотографии и телевидении // ЖНПФК. 1962. Т. 7. № 2. С. 133–138.
7. Гуревич С.Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.–Л.: Энергия, 1964.
8. Lukosz W.J. Optical systems with resolving power exceeding the classical limit // JOSA. 1966. V. 56. № 11. P. 1463–1472.
9. Микаэлян А.Л. Методы оптической обработки информации. М.: Машиностроение, 1989.
10. Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф. Передача и обработка информации голографическими методами. М.: Сов. радио. 1978.
11. Акаев А.А., Жумалиев К.М., Гуревич Б.С., Гуревич С.Б. Оптическое изображение. Передача, обработка, хранение. Бишкек: Илим, 1999.
12. Гуревич Б.С. Информационные процессы и метрика в оптических устройствах обработки и хранения данных // Автореф. докт. дис. СПб.: ИАНП РАН, 2005. 32 с.
13. Gurevich S.B. Information capacity of coherent optical processing systems // Optical Information Processing / Ed. by Nesterikhin Yu.E., Stroke G.W., Cock W.E. N.Y.: Plenum Press, 1976. P. 105–115.