

Преобразование масштаба при формировании и анализе когерентного изображения

В. И. КОНДРАТЕНКО

Появление источников монохроматического излучения с большой длиной когерентности привело к становлению способов безлинзового формирования изображений и развитию методов когерентно-оптической обработки информации, базирующихся на принципах Фурье-оптики. В Гомельском госуниверситете интерес к построению и применению систем оптической обработки информации для задач контроля возник достаточно давно и развивался в различных направлениях. В качестве основных можно выделить технологический контроль [1], в том числе: контроль поверхностных состояний [2], задачи радиовидения [3–4] и проведение экспериментальных исследований в области спектроскопии [5]

Задача построения систем, преобразующих с соблюдением подобия не только энергетические, но и фазово-поляризационные характеристики полей, возникла, по всей видимости, впервые в области голографических измерений, а именно – в радиоголографии. Возникновение голографических принципов синтеза изображений указало на возможность немасштабного моделирования – восстановления с увеличением либо уменьшением относительных электрических размеров изображения по сравнению с электрическими размерами исходного объекта. Одновременно потребовалась и разработка методов синтеза систем, позволяющих осуществить данное преобразование. Особенно актуальным решением этой задачи является в сфере радиоголографических измерений, где различие в продольном и поперечном масштабах изображений может достигать величины $10^4 - 10^5$. Для того чтобы производить моделирование с соблюдением относительного масштаба поля необходимо сильное уменьшение голограммы с разрешением в уменьшенной голограмме, не хуже, чем половина длины волны восстанавливающего излучения (как правило, именно таковы требования на относительный размер элементы дискретизации излучающих систем и шаг при регистрации радиоголограммы). Основным препятствием к этому является пространственное разрешение регистрирующей среды. Поэтому перспективна разработка методов, позволяющих производить преобразование поля, минуя промежуточную фазу записи на фотопластинку "сверхмалой" голограммы. Принципиальная возможность такого подхода показана в работе [6], где рассмотрено применение линзового преобразования масштаба поля при оптическом масштабном восстановлении неоптических голограмм.

Аналогичный подход был применен и при решении задачи о создании фазированной антенной линейки оптического диапазона [7]. Применение систем преобразования масштаба, позволяющих синтезировать излучатели микроскопического размера с заданной диаграммой направленности, формировать в заданной плоскости требуемые распределения мощностей с определенным направлением их потоков, позволяет по иному подойти к принципам построения формирующих оптических систем для технологических целей.

С другой стороны, изображение может претерпевать масштабное преобразование не только при применении специализированных масштаб – преобразующих оптических систем, но и при соответствующем выборе геометрии формирования голографического изображения. Все сказанное в полной мере относится и к формированию изображения при прохождении светового пучка, рассеянного объектом, через элементы оптических систем под большими углами к оптическим осям. Особый интерес представляют углы, близкие критическим, что перспективно для достижения больших масштабных коэффициентов. Для формального опи-

сания построения когерентных изображений авторами применен метод эквивалентного источника. Остановимся кратко на его сущности.

Пусть на координатной плоскости $P(x, y)$, находящейся на расстоянии z от плоскости входного элемента оптической системы $P(\vec{\xi}, \vec{\eta})$ задана поверхность $f(x, y)$, распределение комплексной амплитуды поля на которой определяется функцией $U(x, y)$, а оптический элемент обладает фазовым пропусканием вида $T(\vec{\xi}, \vec{\eta})$. В общем случае апертура объекта может быть неплоской и определяться функцией $\bar{\varphi}(\vec{\xi}, \vec{\eta})$ на координатной плоскости $P(\vec{\xi}, \vec{\eta})$. z – расстояние между точками отсчета O и O' в плоскостях $P(x, y)$ и $P(\vec{\xi}, \vec{\eta})$. В общем случае положение объекта в плоскости $P(x, y)$ может и не совпадать с началом отсчета, однако это легко может быть учтено соответствующим координатным сдвигом x_0, y_0 и изменением вида функции $f(x, y)$.

θ – угол между нормальными к координатным плоскостям объекта $P(x, y)$ и апертуры оптической системы $P(\vec{\xi}, \vec{\eta})$.

Сопоставим реальный источник совместно с границей раздела сред во входной апертуре оптической системы некий "фиктивный" источник, создающий в области раздела поле с той же функцией распределения, что и реальный, но в отсутствие границы.

Искомое распределение поля определится из решения интегрального уравнения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U'(\vec{x}') \exp\{ik_2 R'[\vec{x}', \vec{\xi}, f'(\vec{x}'), g(\xi)]\} dx' = a T(\vec{\xi}) \int_{-\infty}^{+\infty} U(\vec{x}) \exp\{ik_1 R[\vec{x}, \vec{\xi}, f(\vec{x}), g(\xi)]\} dx$$

где a – некоторый постоянный множитель.

Для произвольной поверхности $f(\vec{x})$ решение в каждом конкретном случае будет разным. Однако выбором ограничений на параметры θ и z , а также наложением определенных условий на вид функции $f(\vec{x})$ можно свести решение к виду, связанному с исходной функцией распределения $U(\vec{X})$ соотношением подобия

$$U'(X') \sim U[\varphi(\vec{x})] \quad \text{либо} \quad U'(X') \sim G[\varphi(\vec{\omega})]$$

где $G(\vec{\omega}) = U(\vec{X})$ – трансформанты Фурье, а $\varphi(\vec{X})$ и $\varphi(\vec{\omega})$ – некоторые функции, определяющие преобразование координат в координатном и спектральном пространстве соответственно и во многих практически важных случаях, приобретающих вид постоянного множителя. Таким образом, поле, создаваемое "истинным" источником и преобразованное элементом оптической системы заменяется эквивалентным ему полем некоторого "фиктивного" источника.

Введение степеней свободы, обуславливаемых неплоскостным распределением поля за счет использования функций $f(X)$ и $g(\xi)$, а также учет возможности изменения волнового числа при прохождении через апертуру оптической системы позволяют проводить анализ преобразования поля трехмерных объектов, в том числе рассмотреть трансформацию формы объекта при восстановлении голограммы, преломлении светового пучка на границе раздела и т.д. Поскольку элементов оптических формирующих систем немного, возможным становится установление соответствующих зависимостей для каждого из них, что позволит проводить расчет преобразования, осуществляемого сложной оптической системой, в том числе и при внеосевом формировании изображения.

Другим важным аспектом является возможность применения параксиального приближения для широкоапертурных оптических систем. Действительно, поскольку на расположение эквивалентного источника и его размеры распространяются условия параксиального приближения, они автоматически распространяются и на следующий элемент оптической системы, в каком бы соотношении не находились размеры его апертуры и расстояние до предыдущего элемента. Это позволяет использовать параксиальное приближение для систем,

где оно заведомо неприменимо, т.е. при $a > d$, где a – апертура элемента, а d – расстояние между соседними элементами. В частности, данное обстоятельство позволяет проводить рассмотрение преобразования поля в линзе с учетом ее конкретной толщины и формы поверхности, в делительной пластинке, призме и других элементах, обладающих конечными размерами. Единственным требованием является соотношение параксиальности между размерами элемента и расстоянием до источника поля (объекта). В частности, рассмотрение преобразования светового поля на плоской границе раздела двух сред показало, что при выполнении условий на расположение эквивалентного источника

$$\frac{n_1 \lambda_1}{l_1} = \frac{n_2 \lambda_2}{l_2},$$

он приобретает вид

$$U_2(x_2, y_2) = U_1\left(\frac{x_1}{m_t}, y_1\right)$$

Последнее обстоятельство позволило предложить использование безлинзовых систем преобразования масштаба [8] и соответствующих методик оптического восстановления радиоголограмм [9]. Кроме того, тщательный анализ существующих методик теоретического описания записи и восстановления голограмм выявил определенные некорректности используемых математических приближений. Решение данной задачи в общем виде [10] позволило не только определить условия масштабного восстановления, но и проанализировать погрешности голографических измерений. При внеосевом восстановлении изображение оказывается локализованным на квадратичной поверхности, имеющей форму выпуклого либо вогнутого параболоида, цилиндра либо седловидной поверхности. Также показано, что аналогичные изменения происходят при наклонном прохождении информационного пучка через границу раздела сред. В изображении можно выделить искривление передней и задней поверхностей, причем радиусы кривизны для передней и задней поверхностей различаются; деформации растяжения, сдвига вдоль поперечной оси и общее сжатие в продольном направлении. Существенен также наклон передней и задней граней, причем углы наклонов соответственно различны. Кроме того, фигура повернута на определенный угол. В случае заведомо немасштабного восстановления голограммы либо преобразования влияние погрешностей установки будет зависеть от установочных параметров.

Для достаточно больших углов падения светового пучка на плоскую границу раздела не удаётся получить связь между исходным распределением поля источника и его эквивалентным источником в отсутствие границы раздела в явном виде для произвольной функции распределения комплексной амплитуды. В этом случае более удобным оказывается переход к спектральному представлению сигнала [11].

В случае линейных систем частотный спектр изображения получится в виде произведения спектра пространственных частот $G(\omega)$ функции распределения комплексной амплитуды поля объекта $U(x)$ на частотную характеристику передающей системы. Следует отметить, что указанное преобразование справедливо для линейных цепей, к которым нет оснований причислять границу раздела (даже плоскую) в случае наклонного падения света, так – как преобразование координат оказывается нелинейным:

$$\omega_2 = m_t^{-1} \omega_1 - \frac{\omega_1^2 (1 + m_t^{-2})}{k_1 \sin 2\theta_2}.$$

Формально данное преобразование может быть представлено в виде свертки исходного спектра с δ - функцией Дирака соответствующего аргумента. Это позволяет судить о нелинейности границы раздела, как элемента информационной системы при наклонном прохождении информационного пучка даже в простейших случаях. Однако проведенные расчеты и результаты экспериментального моделирования указывают на возможность компенсации квадратичного набега в области пространственных частот и построения безабберационных преобразователей масштаба на основе применения призматических систем.

Важным приложением средств оптической обработки информации является технологический контроль состояния поверхности после обработки. Как известно, вид статистики распределения микронеровностей поверхности полностью определяет вид спектра рассеянного излучения. В существующих системах оптического контроля, как правило, производится измерение интегральных характеристик излучения, а определение параметров светорассеяния производится в предположении Гауссовой статистики поверхности реже (для пленочных структур преимущественно) и в приближении Пуассоновской статистики. Существует ряд разновидностей систем фотометрического контроля и множество направлений их развития [12]. Наиболее перспективным представляется метод, основанный на измерении

$$TIS = I_{\Delta} / I,$$

т.е. отношение интенсивности рассеянной компоненты светового поля I_{Δ} к интенсивности световой волны, отраженной зеркально I_{Δ} . Такое отношение не зависит от коэффициента отражения контролируемого материала. При использовании в качестве зондирующего светового пучка лазерного излучения, зеркальную компоненту можно рассматривать как нулевую частоту (при нормальном падении) в спектре рассеянного излучения. Серьезным источником погрешности при этом является необоснованное использование при анализе результатов измерений статистики Гаусса, что как раз и предписывается многочисленными нормативными документами. Как следует из исследований последних лет, нормальное распределение является скорее исключением [13], чем правилом, и применимо только к узкому классу аморфных объектов, в то время как для кристаллических и поликристаллических структур естественной является статистика Пуассона ввиду дискретности структуры вещества и как следствие – счетности числа возможных направлений скола поверхности при обработке. Спад спектральной кривой для статистики Пуассона имеет гиперболический вид в отличие от экспоненциального вида при нормальном распределении. Как следствие, вклад в зеркальную компоненту при одинаковых σ оказывается значительно более существенным, что может приводить к большим погрешностям при необоснованном использовании типа статистики. В данном случае погрешность имеет случайный характер, асимптотически стремится к нулю при стремлении автокорреляционной длины профиля Λ к нулю (гипотетический случай) и к бесконечности (сверхгладкие поверхности). Относительная погрешность определения σ может достигать 100% и более, что делает измерения практически недостоверными.

Таким образом, фотометрический контроль по анализу TIS в существующем виде не может быть применим, кроме как в области контроля сверхгладких поверхностей. Это, впрочем, относится и к любому другому виду контроля, в том числе и профилометрическому, так как частотные ограничения характерны для любого вида контроля ввиду конечности размеров зонда, что приводит к потере чувствительности в области высоких пространственных частот.

Поэтому перспективным является развитие методов, базирующихся на анализе вида углового распределения либо спектра светорассеяния (DIS). Важной особенностью при этом является наличие анизотропии поверхностного светорассеяния, что требует применения азимутального усреднения индикатрисы, подразумевающего осуществление операции интегрирования светового поля по азимутальному углу [13–16]. Методами оптической обработки данная операция может быть осуществлена при помощи конической, сфероконической либо тороидальной линзы или путем применения пространственно модулированных зондирующих пучков [17]. Преобразование поля, осуществляемое тороидальной линзой с точностью до несущественного постоянного множителя может быть представлено в виде

$$V(x', z) \sim e^{\frac{ikcz}{2}} \left\{ e^{ikcx'} \hat{F}_{\omega+\omega_0(z)} \left[U_x e^{\frac{ik}{f} \left(1 - \frac{z}{f}\right) x^2} \right] + e^{ikcx'} \hat{F}_{\omega+\omega_0(z)} \left[U(x) e^{\frac{ik}{f} \left(1 - \frac{z}{f}\right) x^2} \right] \right\}$$

$$\omega = \frac{kx}{f}, \omega_0 = \frac{k}{f}z$$

где f – фокусное расстояние сферической компоненты, α – параметр наклона конической компоненты сфероконической системы.

Распределение поля на оси системы пропорционально общей интенсивности излучения, рассеянного под углом

$$\varphi = \frac{z}{f}$$

к оптической оси системы. Это позволяет проводить указанную выше операцию регистрации углового распределения рассеянного поля с одновременным азимутальным интегрированием. Для широкоапертурных объектов такая процедура оказывается невозможной, но при выполнении условий равенства расстояний до объекта, плоскости регистрации и фокусного расстояния

$$V(x') \sim e^{ik\alpha x'} G\left(\frac{kx}{f} - k\alpha\right) + e^{ik\alpha x'} G\left(\frac{kx}{f} + k\alpha\right)$$

и поле на оси системы представляет собой полную интенсивность излучения рассеянного под углом α [18].

В случае малых зон контроля возможно создание корректирующего элемента, лишенного апертурных ограничений [15]. Для этого с геометрической точки зрения необходимо, чтобы все лучи, выходящие из точки расположения объекта, находящегося на оси системы, после преломления в элементе распространялись нормалью к плоскости основания элемента. В полярных координатах данное требование может быть записано в виде дифференциального уравнения, определяющего форму поверхности.

$$-n \frac{d\rho}{d\Theta} - \rho[(1 - n \cos \Theta) \sin \Theta + n \sin \Theta \cos \Theta] = n^2 \sin \Theta \cos \Theta d$$

При расположении объекта в непосредственной близости от входной плоскости элемента ($d \rightarrow 0$) решение данного уравнения имеет вид

$$\rho = \frac{c}{n - \sin \Theta}$$

и искомая поверхность представляет собой эллипсоид вращения. Тогда распределение поля непосредственно в выходной плоскости элемента представляет собой в общем случае искаженный (вполне закономерным образом), но лишенный апертурных ограничений спектр пространственных частот исходного распределения поля

$$U(x) = G\left(\frac{c\omega}{nk_1 - \omega}\right)$$

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики может быть компенсирована введением компенсирующего амплитудного транспаранта. В области малых пространственных частот спектр пространственных частот можно считать неискаженным. На основе данного элемента в совокупности с призмным процессором преобразования масштаба оказывается возможным синтез оптической системы, осуществляющей формирование изображения без потери высоких пространственных частот

Abstract. The author considers features of application of an equivalent source for the solution of the problems of formation of the image and processing of the information in coherent optical systems, analyzes features of extra-axial restoration of holograms, including non-optical ones with the possibility of changing longitudinal and cross-section scales of the image.

Литература

1. А. Ю. Шевардин, В. И. Кондратенко, В. В. Сытько, Н. И. Алешкевич, *Устройство для контроля формы изделий*. АС СССР 1631459 МПК G 01B 29/10, 1989.

2. В. И. Кондратенко и др., *Способ определения шероховатости поверхности и устройство для его осуществления*, АС СССР 1752997 МПК G 01B 11/30, 1992.
3. В. Н. Школдин, П. А. Хило, В. И. Кондратенко, Ю. А. Василенко, *Устройство для оптического моделирования диаграммы направленности антенны*, АС СССР 1252741 МПК G 01R 29/10, 1985.
4. В. И. Кондратенко, Н. И. Алешкевич, В. В. Сытько, *Устройство для определения диаграммы направленности антенны*, АС СССР 1631459 МПК G 01R 29/10, 1987.
5. В. И. Кондратенко, М. Ю. Першина, В. В. Сытько, Н. И. Алешкевич, *Способ определения абсолютного квантового выхода люминесценции*, АС СССР 1698159 МПК G 01N 21/64, 1983
6. А. С. Ключников, Н. И. Алешкевич, В. И. Кондратенко, *Оптическое восстановление СВЧ-голограмм*, Вестник БГУ им В. И. Ленина, Сер. 1, №2 (1989), 15–19.
7. А. С. Ключников, Н. И. Алешкевич, В. И. Кондратенко, *К вопросу об управлении фазовой структурой световых пучков*, Вестник БГУ им В. И. Ленина, Сер. 1, №1 (1990), 12–15.
8. В. И. Кондратенко, *Когерентно-оптический преобразователь масштаба поля*, Патент РБ 2521 МПК G 01R 29/10, 1998.
9. В. И. Кондратенко, И. В. Коваль, Е. Л. Тихова, Н. И. Алешкевич, *Устройство для оптического моделирования диаграмм направленности антенн*, Патент РБ 2545 МПК G 01R 29/10, 1998.
10. Н. И. Алешкевич, А. С. Ключников, В. И. Кондратенко, *Оптическое восстановление СВЧ-голограмм*, Вестник БГУ им В. И. Ленина, Сер. 1, №3 (1993), 17–21.
11. В. И. Кондратенко, М. И. Пастухов, В. В. Сытько, *Частотная характеристика границы раздела как элемент оптической информационной системы*, Материалы международной научно-технической конференции, "Актуальные проблемы развития технических систем", Гомель, 1998, 205–207
12. Н. И. Алешкевич, В. И. Кондратенко, В. В. Сытько, В. П. Трушко, *Фотометрический контроль шероховатости и дефектности*, Минск: БелНИИ НТИ, 1989.
13. В. И. Кондратенко, В. В. Сытько, Д. С. Умрейко, *Фотометрический контроль состояния поверхности*, Известия Белорусской инженерной академии, № 1(7), 1999, 42–45.
14. М. И. Пастухов, В. И. Кондратенко, *Особенности контроля состояния поверхностей узлов трения*, В сб. "Совершенствование конструкции, ремонта и обслуживания подвижного состава железных дорог", Гомель, 1998, 43–48.
15. В. И. Кондратенко, М. И. Пастухов, В. В. Сытько, *Метрологические аспекты неразрушающего контроля шероховатости технологических поверхностей*, Международный сборник научных трудов "Прогрессивные технологии и системы машиностроения", 2. Вып. 6 (1998), 85–88.
16. В. И. Кондратенко, М. И. Пастухов, В. В. Сытько, *Фотометрический контроль высокого разрешения*, Материалы международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы развития технических систем", Гомель, 1998, 185–186.
17. М. И. Пастухов, В. И. Кондратенко, Е. Л. Тихова, В. В. Сытько, *Способ и устройство для определения шероховатости поверхности*, Патент РБ 6158 МПК G 01B 11/30, 2004.
18. С. В. Шалупаев, В. И. Кондратенко, В. П. Морозов, *Определение среднеквадратичной высоты микронеровностей по методу рассеянного света с возможностью определения статистического распределения неоднородностей поверхности*, Материалы XLIII Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". Витебск, 2004, 247–252.