

УДК 621.373.826:772.99

ОПТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ГОЛОГРАММЫ

© 2004 г. Т. В. Богданова*, В. П. Титарь **, канд. физ.-мат. наук

* Научно-исследовательский институт лазерных технологий, Харьков, Украина

** Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

E-mail: Vladimyr.P.Titar @ univ.kharkov.ua, tatyana.bogdanova@rambler.ru

Рассмотрены три вида комплексных голограмм, которые описываются с помощью комплексных преобразований Фурье, Френеля и Хартли, приведены их цифровые модели и алгоритмы цифрового моделирования. Показано, что коэффициент отражения и изменение фазы при отражении от поверхности объекта можно определять не только по восстановленному изображению, но и при анализе структуры регистрируемой пары квадратурных составляющих комплексной голограммы.

Коды OCIS: 090.0090.

Поступила в редакцию 26.08.2003.

Введение

Оптическая комплексная голограмма представляет собой сумму двух квадратурных составляющих, формируемых на двух плоскостях при интерференции отраженного от объекта когерентного излучения, и двух опорных волн с заданной поляризацией, фаза одной из которых отличается от второй на $\pi/2$.

В классической оптике [1], как правило, рассматривается одна из таких квадратурных составляющих, зарегистрированная с помощью одной опорной волны на голограмме. По такой голограмме и восстановленному по ней изображению можно определить форму и размеры объекта, но нельзя определить коэффициент отражения излучения от поверхности объекта и величину изменения фазы волны при отражении излучения от объекта.

Комплексные голограммы содержат информацию не только о форме поверхности и размерах объекта, но и о его комплексной функции отражения [2–4]. Так, например, в радиоголографии при восстановлении изображения по зарегистрированным комплексным радиоголограммам, состоящим из двух квадратурных составляющих [5, 6], имеется возможность определять фазу и поляризацию излучения, отраженного от объекта. Изучены некоторые свойства комплексных голограмм Френеля, в частности квазипериодическая зависимость их структур от геометрических размеров и параметров дискретизации объекта и голограммы, а также от положения объекта на голографируемой плоскости [7]. Разработаны алгоритмы и проведено цифровое

моделирование процессов формирования комплексных голограмм Фурье и Френеля и восстановленных по ним изображений при воздействии на них аддитивных случайных помех [8]. Рассмотрена возможность применения комплексных оптических голограмм в системах регистрации голографической информации и передачи ее по каналам связи [9]. При этом предложен метод регистрации комплексных голограмм с помощью дискретной квазипериодической приемной решетки.

Известно, что с помощью комплексных оптических голограмм Фурье и Френеля имеется возможность восстанавливать единственное истинное изображение объекта, например, при одновременном облучении пары квадратурных составляющих комплексной голограммы двумя когерентными пучками со сдвигом фаз между ними на $\pi/2$ [10]. Разработаны алгоритмы формирования комплексных цифровых голограмм Фурье и Френеля для объектов с вещественными функциями отражения, проведено цифровое моделирование таких голограмм, создана установка для восстановления по ним изображений, а также экспериментально проверена возможность восстановления оптических изображений по комплексным цифровым голограммам [11].

В фурье-оптике [12] рассматриваются спектры Фурье, как правило, плоских объектов простых геометрических форм, но еще мало изучены свойства комплексных спектров Фурье.

В настоящей статье рассмотрены условия формирования комплексных голограмм, которые могут быть описаны с помощью комплексных преобразований Фурье, Френеля и Хартли [2–4, 13] для плоских

объектов с комплексными функциями отражения. Рассмотрены структуры комплексных голограмм и восстановленных по ним изображений. Приведены алгоритмы и результаты цифрового моделирования комплексных голограмм для объектов с металлическими и диэлектрическими поверхностями.

Комплексные голограммы Фурье и Френеля

Пусть на голографируемый прямоугольный объект с координатами краев x_1, x_2, y_1, y_2 , имеющий плоскую однородную зеркально отражающую поверхность, нормально падает линейно поляризованная плоская однородная волна лазерного излучения с вектором поляризации, параллельным плоскости падения. Тогда комплексный коэффициент отражения для заданного типа материала поверхности объекта может быть представлен в виде [1]

$$S = R^{1/2} \exp(i\theta), \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения, θ – изменение фазы волны при отражении от объекта. При регистрации отраженного излучения на комплексной голограмме по ее интерференционной структуре можно получить информацию о R и θ , а также о коэффициентах преломления k и поглощения χ [3, 4].

Схема формирования комплексных голограмм представлена на рис. 1.

Излучение лазера 1 делится полупрозрачным зеркалом 2 на два канала – объектный и опорный, который в свою очередь делится на два опорных канала полупрозрачным зеркалом 10. В объектном канале излучение E , отраженное от объекта 4, с помощью полупрозрачного зеркала 3 и – для голограмм Фурье – с помощью линзы 5 направляется на полупрозрачное зеркало 7 и делится на два ортогональных луча. При этом ПЗС-матрицы 8, 8' находятся в фокальной плоскости линзы 5, которая осуществляет фурье-преобразование объектной волны. При формировании голограмм Френеля линза 5 не используется. В опорных каналах с помощью полупрозрачного зеркала 10, отражателей 9, 9' и 9'' и телескопических систем 11, 11' формируются две волны опорного излучения с плоским волновым фронтом. В один из опорных каналов вводят четвертьволновую пластинку 12, с помощью которой сдвигают фазу волны на $\pi/2$ по отношению к фазе волны второго опорного канала.

Комплексная голограмма формируется в виде пары голограмм (двух квадратурных составляющих), разнесенных в пространстве, при регистрации на ПЗС-матрицах 8, 8', расположенных на плоскостях двугранного угла устройства 6, полей,

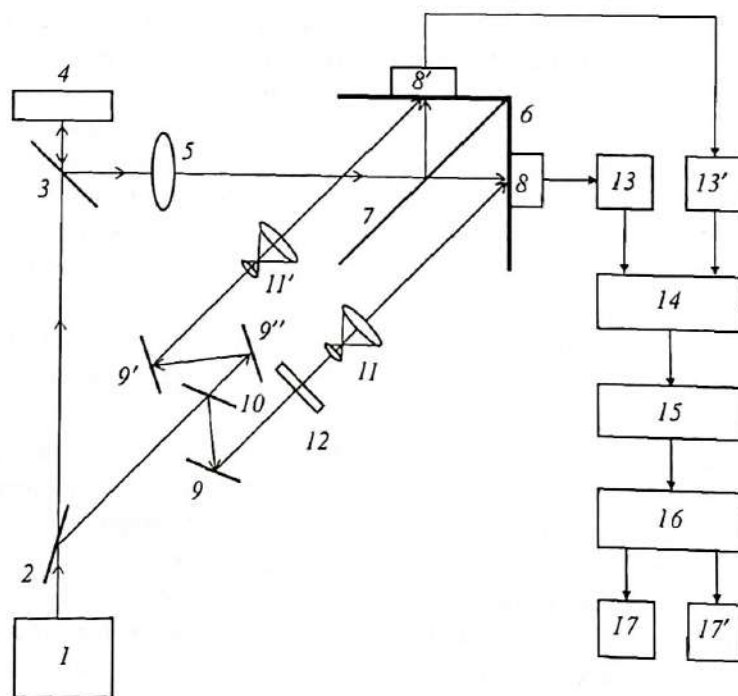


Рис. 1. Схема формирования комплексных голограмм Фурье и Френеля. 1 – лазер; 2, 3 – полупрозрачные зеркала; 4 – объект; 5 – линза; 6 – устройство регистрации комплексных голограмм; 7 – полупрозрачное зеркало; 8, 8' – матрицы ПЗС, расположенные на плоскостях двугранного угла устройства 6; 9, 9', 9'' – отражатели; 10 – полупрозрачное зеркало; 11, 11' – телескопические системы; 12 – четвертьволновая пластинка; 13, 13' – предусилители электрических сигналов; 14 – регистр памяти; 15 – быстродействующий аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 16 – специализированный процессор; 17, 17' – квадратурные составляющие комплексной голограммы.

формируемых при интерференции объектной волны

$$E(\mu, \nu) = A_n A_E(\mu, \nu) R^{1/2} \exp\{i[\theta_n + \theta + \theta_E(\mu, \nu)]\}, \quad (2)$$

(где A_n и θ_n – амплитуда и фаза падающей волны, A_E и θ_E – амплитуда и фаза дифракционного интеграла) и двух опорных волн, отличающихся по фазе на $\pi/2$ [10]

$$E_{01} = A_0(\mu, \nu) \exp[i\theta_0(\mu, \nu)];$$

$$E_{02} = A_0(\mu, \nu) \exp\{i[\theta_0(\mu, \nu) + \pi/2]\}, \quad (3)$$

где $A_0(\mu, \nu)$ – амплитуда опорного излучения; $\theta_0(\mu, \nu)$ – его фаза,

$$\theta_0(\mu, \nu) = (2\pi/\lambda)(\mu \sin \alpha + \nu \sin \beta) + \theta_{01}, \quad (4)$$

α, β – углы наклона опорной волны к осям μ, ν ; θ_{01} – начальная фаза опорной волны; λ – длина волны лазерного излучения. При этом регистрируются две квадратурные составляющие комплексной голограммы

$$\Gamma_1(\mu, \nu) = |E(\mu, \nu) + E_{01}(\mu, \nu)|^2, \quad (5)$$

$$\Gamma_2(\mu, \nu) = |E(\mu, \nu) + E_{02}(\mu, \nu)|^2. \quad (6)$$

Электрические сигналы с выходов фоторегистрирующих устройств 8, 8' через предусилители 13 и 13' поступают в регистр памяти 14, накапливаются, запоминаются и последовательно подключаются на вход быстродействующего АЦП 15, преобразуются в цифровой код и вводятся в оперативную память специализированного процессора 16, где образуют квадратурные составляющие 17 и 17' комплексной матрицы голограммы.

Дифракционный интеграл, соответствующий комплексной голограмме Фурье, с точностью до постоянных множителей имеет вид

$$E_\Phi(\mu, \nu) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \exp[-i(2\pi/\lambda f)(\mu x + \nu y)] dx dy, \quad (7)$$

где x, y – координаты в плоскости объекта; μ, ν – координаты в плоскости голограммы; f – фокусное расстояние линзы, формирующей голограмму Фурье. На расстоянии r от объекта в области дифракции Френеля дифракционный интеграл с точностью до постоянных множителей может быть представлен в виде

$$E_{\Phi r}(\mu, \nu) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \exp\{i(\pi/\lambda r)[(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2]\} dx dy. \quad (8)$$

Интерференционные компоненты квадратурных составляющих комплексной голограммы можно записать в виде

$$\Gamma_1(\mu, \nu) = 2A_n A_E(\mu, \nu) A_0(\mu, \nu) R^{1/2} \cos[\theta_n + \theta_E(\mu, \nu) + \theta - \theta_0(\mu, \nu)], \quad (9)$$

$$\Gamma_2(\mu, \nu) = 2A_n A_E(\mu, \nu) A_0(\mu, \nu) R^{1/2} \sin[\theta_n + \theta_E(\mu, \nu) + \theta - \theta_0(\mu, \nu)]. \quad (10)$$

Следовательно, информация о величине изменения фазы волны при отражении от объекта записана в виде дополнительного фазового смещения интерференционных полос на величину θ в каждой из квадратурных составляющих комплексных голограмм Фурье и Френеля. Таким образом, относительное изменение θ можно определить по относительному сдвигу интерференционных полос на комплексных голограммах объектов с различными оптическими характеристиками отражающих поверхностей.

Оптическое восстановление изображений по комплексным голограммам может быть произведено в соответствии со схемой, приведенной в [11].

Отметим, что с помощью ПЗС-матрицы регистрируется дискретная голограмма, свойства которой отличаются от свойств голограмм, регистрируемых на мелкозернистых или сплошных фоторегистрирующих средах. Восстановленное по такой дискретной голограмме цифровое изображение также является дискретным, причем его качество зависит от параметров дискретизации голограммы, ее размеров и других параметров схемы голографирования. Следовательно, при регистрации дискретных голограмм необходимо учитывать параметры дискретизации голограммы и восстановленного изображения.

В данной работе рассматривается цифровой метод восстановления изображений по комплексным голограммам Фурье и Френеля с помощью обратных дискретных преобразований Фурье и Френеля соответственно. При этом для выполнения условий дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова должны соблюдаться определенные условия дискретизации голограммы и восстановленного изображения [14, 15]. Для голограмм Фурье и Френеля соответственно интервалы дискретизации голограммы $\Delta\mu_\Phi, \Delta\nu_\Phi, \Delta\mu_{\Phi r}, \Delta\nu_{\Phi r}$ вдоль осей μ и ν (в нашем случае – расстояния между элементами ПЗС-матрицы) должны быть равны

$$\Delta\mu_\Phi = \lambda f / X_{об}, \quad \Delta\nu_\Phi = \lambda f / Y_{об}, \quad (11)$$

$$\Delta\mu_{\Phi r} = \lambda r / X_{об}, \quad \Delta\nu_{\Phi r} = \lambda r / Y_{об}, \quad (12)$$

где $X_{об}$ и $Y_{об}$ – размеры области восстановленного изображения. При этом интервалы дискретизации области восстановленного изображения

$$\Delta x_\Phi = \lambda f / X_r, \quad \Delta y_\Phi = \lambda f / Y_r, \quad (13)$$

$$\Delta x_{\Phi r} = \lambda r / X_r, \quad \Delta y_{\Phi r} = \lambda r / Y_r, \quad (14)$$

где X_r и Y_r – размеры голограммы вдоль осей μ и ν соответственно. Числа дискретных элементов голограммы N_{xr} , N_{yr} и восстановленного изображения N_x , N_y вдоль соответствующих осей при этом определяются соотношениями

$$N_{xr} = N_x = M = X_{об} X_r / \lambda r, \quad (15)$$

$$N_{yr} = N_y = N = Y_{об} Y_r / \lambda r. \quad (16)$$

При выполнении указанных условий дискретизации восстановление изображений можно проводить с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) и дискретного преобразования Френеля, в котором также используется БПФ [14, 15].

Если регистрируемая голографическая информация передается по каналам связи, то имеется возможность сократить ее избыточность. При этом каждая квадратурная составляющая комплексной голограммы может быть зарегистрирована на неэквидистантной дискретной приемной решетке, называемой “квазипериодической решеткой” [9]. Пределы сокращения избыточности голографической информации определяются степенью согласования пространственных частот объекта с параметрами дискретизации этой решетки. Параметры восстановленного изображения при этом зависят как от общего числа регистрирующих элементов, так и от закона распределения элементов на приемной матрице [9, 16]. Частотная передаточная функция (ЧПФ) [12] приемной неэквидистантной решетки обладает фильтрующими свойствами в области пространственных частот. Найденные в [16] соотношения между параметрами ЧПФ приемной решетки и размерами объектов позволяют выбирать оптимальные условия выделения объектов с заданными размерами при требуемом отношении интенсивности восстановленного изображения к интенсивности помех.

Параметры ЧПФ приемной решетки можно согласовывать с объектами заданных размеров при помощи характеристики контраста восстановленного изображения [16], оценивать как степень подавления пространственных частот объектов других размеров, так и качество восстановленных изображений объектов заданных размеров.

Регистрация голографируемой сцены, состоящей из объектов с различными размерами и коэффициентами отражения, с помощью неэквидистантной приемной решетки, параметры которой согласованы с пространственными частотами выделяемого объекта, приводит к подавлению изображений других объектов, имеющих более высокие пространственные частоты и меньшие коэффициенты отражения, чем выделяемый объект. При этом происходит увеличение отношения интенсивности изображения выделяемого объекта к интенсивности фона по срав-

нению с исходным. Коэффициент передачи контраста такой голографической системы превышает единицу. Крупномасштабные участки голографируемой сцены практически исчезают в изображении вследствие рассогласования их спектров пространственных частот с параметрами ЧПФ голограммы. Мелкие объекты с коэффициентами отражения, существенно меньшими, чем коэффициент отражения выделяемого объекта, исчезают в восстановленном изображении вследствие того, что интенсивность изображений этих объектов близка к интенсивности фона [16].

Алгоритмы и результаты цифрового моделирования

Алгоритмы цифрового моделирования комплексных голограмм Фурье и Френеля были разработаны по аналогии с алгоритмами, приведенными в [9]. Цифровое моделирование комплексной голограммы Фурье и восстановление по ней изображения включает в себя следующие операции (при выполнении условий дискретизации (11)–(16)):

1. Задание размеров матрицы голограммы $M \times N$.
2. Задание длины волны излучения λ , дискретных координат краев объекта m_1 , m_2 , n_1 , n_2 и параметров его отражающей поверхности на заданной длине волны – коэффициентов преломления k и поглощения χ .
3. Вычисление комплексного коэффициента отражения поверхности объекта по формуле [1]

$$S = [(k + i\chi) - 1] / [(k + i\chi) + 1]. \quad (17)$$

4. Задание объектной матрицы
- $$S(m, n) = (0, 0), (m = 0, \dots, M - 1; n = 0, \dots, N - 1). \quad (18)$$

5. Задание двумерной комплексной функции отражения объекта

$$S(m, n) = S \text{ при } m = m_1, \dots, m_2; n = n_1, \dots, n_2. \quad (19)$$

6. Вычисление интерференционной составляющей комплексной голограммы Фурье объекта с помощью алгоритма двумерного БПФ

$$\Gamma_\Phi(p, q) = F[S(m, n)] \quad (m = 0, \dots, M - 1; n = 0, \dots, N - 1; p = 0, \dots, M - 1; q = 0, \dots, N - 1), \quad (20)$$

где F – оператор дискретного двумерного преобразования Фурье.

6. Вывод на печать квадратурных составляющих комплексной голограммы Фурье $\text{Re} \Gamma_\Phi(p, q)$ и $\text{Im} \Gamma_\Phi(p, q)$ в виде матрицы численных значений и в символьном виде.

7. Вычисление поля, формирующего восстановленное изображение (в дальнейшем – изображение) с помощью алгоритма обратного двумерного БПФ

$$J_{\Phi}(u, v) = F^{-1}[\Gamma_{\Phi}(p, q)] \quad (p = 0, \dots, M-1; q = 0, \dots, N-1; u = 0, \dots, M-1; v = 0, \dots, N-1), \quad (21)$$

где F^{-1} – оператор обратного двумерного дискретного преобразования Фурье.

8. Вычисление интенсивности поля, формирующего восстановленное изображение (в дальнейшем – интенсивность восстановленного изображения)

$$I_{\Phi}(u, v) = |J_{\Phi}(u, v)|^2. \quad (22)$$

9. Вывод на печать поля $J_{\Phi}(u, v)$, формирующего восстановленное изображение, и интенсивности изображения $I_{\Phi}(u, v)$, восстановленного по голограмме Фурье, в виде матрицы численных значений и в символьном виде.

Цифровое моделирование комплексной голограммы Френеля и восстановление по ней изображения включает в себя следующие операции:

1. Задание размеров матрицы голограммы $M \times N$.
2. Задание длины волны излучения λ и параметров схемы голографирования: интервалов дискретизации голограммы $\Delta\mu_{\Phi}, \Delta\nu_{\Phi}$; расстояния r от объекта до голограммы.

3. Вычисление интервалов дискретизации объекта $\Delta x_{\Phi}, \Delta y_{\Phi}$ в соответствии с выражениями (11)–(16)

$$\Delta x_{\Phi} = \lambda f / X_r = \lambda f / \Delta\mu M, \quad \Delta y_{\Phi} = \lambda f / Y_r = \lambda f / \Delta\nu N. \quad (23)$$

4. Задание дискретных координат краев объекта m_1, m_2, n_1, n_2 и параметров его отражающей поверхности на заданной длине волны – коэффициентов преломления k и поглощения χ .

5. Вычисление комплексного коэффициента отражения объекта по формуле (17).

6. Задание объектной матрицы и двумерной комплексной функции отражения объекта по формулам (18), (19).

7. Вычисление интерференционной составляющей комплексной голограммы Френеля объекта с помощью алгоритма дискретного преобразования Фурье [15]

$$\begin{aligned} \Gamma_{\Phi}(p, q) = & \exp\{i(\pi/\lambda r)[(p\Delta\mu)^2 + (q\Delta\nu)^2]\} \times \\ & \times F\{S(m, n)\exp[i(\pi/\lambda r)[(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2]\} \\ & (m = 0, \dots, M-1; n = 0, \dots, N-1; \\ & p = 0, \dots, M-1; q = 0, \dots, N-1), \end{aligned} \quad (24)$$

в котором используется БПФ.

8. Вывод на печать квадратурных составляющих комплексной голограммы Френеля $\text{Re}\Gamma_{\Phi}(p, q)$ и $\text{Im}\Gamma_{\Phi}(p, q)$ в виде матрицы численных значений и в символьном виде.

9. Восстановление изображения по комплексной голограмме Френеля с помощью алгоритма обрат-

ного дискретного преобразования Фурье [15]

$$\begin{aligned} J_{\Phi}(u, v) = & \exp\{i(\pi/\lambda r)[-(u\Delta x)^2 - (v\Delta y)^2]\} \times \\ & \times F^{-1}\{\Gamma_{\Phi}(p, q)\exp[i(\pi/\lambda r)[-(p\Delta\mu)^2 - (q\Delta\nu)^2]\} \\ & (p = 0, \dots, M-1; q = 0, \dots, N-1; \\ & u = 0, \dots, M-1; v = 0, \dots, N-1). \end{aligned} \quad (25)$$

10. Вычисление интенсивности восстановленного изображения

$$I_{\Phi}(u, v) = |J_{\Phi}(u, v)|^2. \quad (26)$$

11. Вывод на печать поля $J_{\Phi}(u, v)$, формирующего восстановленное изображение, и интенсивности изображения $I_{\Phi}(u, v)$, восстановленного по голограмме Френеля, в виде матрицы численных значений и в символьном виде.

Цифровое моделирование квадратурных составляющих комплексных оптических голограмм Фурье и Френеля объектов с комплексными функциями отражения и восстановления по ним изображений проводилось при следующих значениях параметров: матрица с размерами $M \times N = 64 \times 64$; длина волны $\lambda = 600$ нм; расстояние от объекта до голограммы $r = 30$ см (при моделировании голограмм Френеля); интервалы дискретизации голограммы $\Delta\mu_{\Phi} = \Delta\nu_{\Phi} = 0,001$ см (при моделировании голограмм Френеля); интервалы дискретизации объекта, вычисленные по (22), равны $\Delta x_{\Phi} = \Delta y_{\Phi} = 0,028$ см (при моделировании голограмм Френеля); размеры объекта голографирования 4×4 дискретных элемента. Оптические параметры отражающих поверхностей соответствовали следующим металлам и диэлектрикам, перечисленным в порядке убывания величины изменения фазы при отражении: барий, стронций, кальций, магний, церий, лантан, марганец, бериллий, алюминий, тяжелый крон (ТК). Эти параметры приведены в таблице.

Оптические параметры отражающих поверхностей объектов голографирования (при длине волны 600 нм)

Материал	Коэффициент преломления k	Коэффициент поглощения χ	ReS	ImS	R	θ , град
Ba	0,90	1,53	0,36	0,51	0,39	54
Sr	0,72	2,25	0,57	0,56	0,63	45
Ca	0,46	2,50	0,65	0,59	0,77	42
Mg	0,50	3,94	0,83	0,44	0,875	28
Ce	2,10	2,59	0,61	0,32	0,47	27,5
La	1,90	3,70	0,74	0,33	0,64	24
Mn	2,68	3,09	0,68	0,27	0,533	22
Be	2,78	2,70	0,65	0,25	0,482	21
Al	0,83	5,70	0,89	0,32	0,90	19,7
ТК	1,60	0	0,23	0	0,053	0

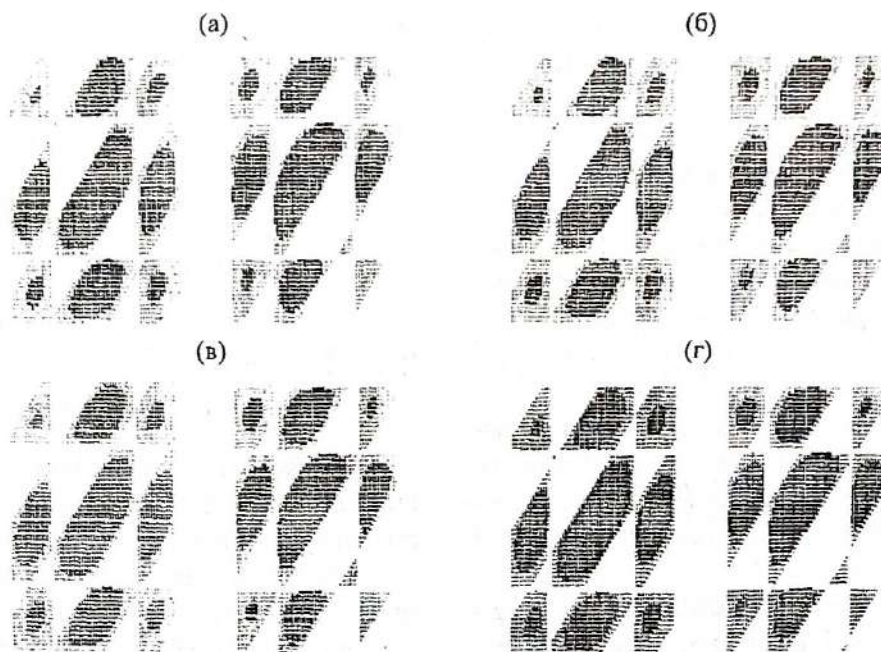


Рис. 2. Вещественные и мнимые составляющие комплексных голограмм Фурье для плоских объектов с отражающей поверхностью из магния (а), церия (б), марганца (в), алюминия (г).

Полученные цифровые модели комплексных голограмм или дифракционных картин в виде символьных распределений интенсивности зарегистрированных голограмм можно рассматривать в качестве аналога регистрируемых в оптике на фотопластинках (или других фотоприемных устройствах) голографических структур в виде почернения фотослоя.

На рис. 2 показаны наиболее характерные структуры вещественных и мнимых компонентов оптических голограмм Фурье, полученные с помощью моделирования. Смещение интерференционных по-

лос на этих голограммах в зависимости от величины θ для данной металлической поверхности приводит к изменению наблюдаемой макроструктуры квадратурных составляющих голограммы Фурье. При этом структуры цифровых моделей квадратурных составляющих голограмм Фурье однозначно зависят от значений фазы функции отражения материалов поверхностных слоев объектов голографирования.

На рис. 3 приведены наиболее характерные интерференционные компоненты квадратурных со-

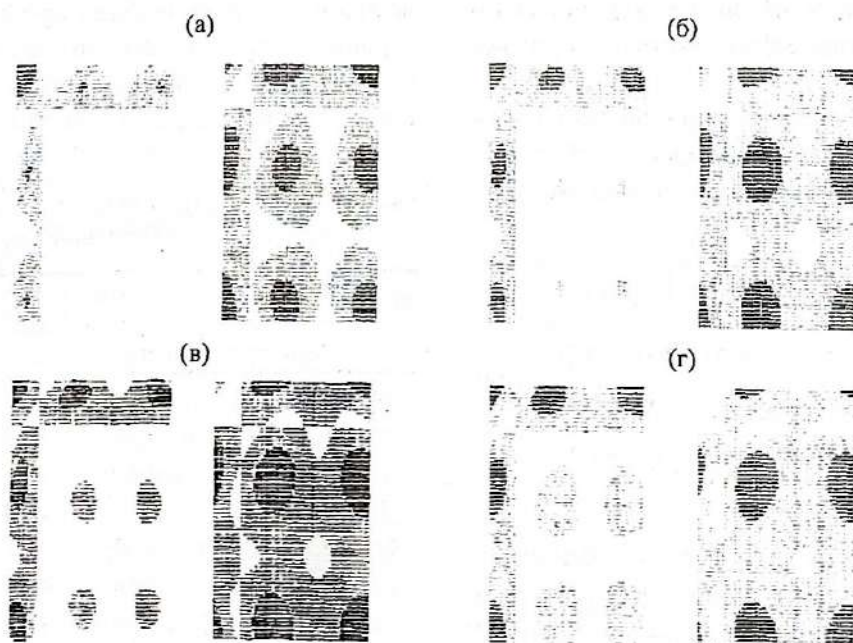


Рис. 3. Вещественные и мнимые составляющие комплексных голограмм Френеля для плоских объектов с отражающей поверхностью из бария (а), магния (б), алюминия (в), тяжелого крона (г).

ставляющих комплексных голограмм Френеля, представляющие собой для всех моделируемых объектов аналогичные четырехлепестковые структуры, заключенные в прямоугольную рамку. Размеры прямоугольной рамки и геометрическое положение лепестков структуры рассматриваемых интерференционных картин определяются формой и размерами объекта, а яркость и размеры лепестков структур интерференционных компонентов зависят от оптических свойств металлических поверхностей. Изменение структур вещественной и мнимой составляющих голограмм Френеля, как и голограмм Фурье, в основном зависит от изменения фазы функции отражения объекта θ .

Комплексные голограммы Хартли

В [17] предложен способ записи голографической информации о комплексном объекте с помощью пары голограмм Хартли, содержащих не зависящую друг от друга информацию: одна голограмма содержит информацию о вещественной части функции отражения объекта, а вторая голограмма – о ее мнимой части. В [13] описан метод регистрации голограмм Хартли объектов с комплексными функциями отражения и восстановления по ним изображений с пространственным разделением информации о квадратурных составляющих функций отражения объектов в плоскости восстановленного изображения. Рассмотрим формирование комплексной голограммы Хартли для объектов с комплексными функциями отражения и восстановления изображений таких объектов.

Преобразование Фурье вещественной функции $F[S_0(x, y)]$ связано с преобразованием Хартли $H[S_0(x, y)]$ этой же функции соотношением [17]

$$H[S_0(x, y)] = \text{Re}\{F[S_0(x, y)]\} - \text{Im}\{F[S_0(x, y)]\}, \quad (27)$$

где F – оператор преобразования Фурье, H – оператор преобразования Хартли. Применив правую часть этого соотношения к преобразованию Фурье комплексной функции отражения $S(x, y)$, получим комплексное преобразование Хартли, выражаемое оператором H' [13],

$$H'[S(x, y)] = H[\text{Re}S(x, y)] - OH[\text{Im}S(x, y)]. \quad (28)$$

В этом соотношении интегральное преобразование вещественной составляющей функции отражения $\text{Re}S(x, y)$ соответствует преобразованию Хартли [17]

$$H[\text{Re}S(x, y)] = 2 \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \text{Re}S(x, y) \cos[(\pi/4) - (2\pi/\lambda f)(\mu x + \nu y)] dx dy, \quad (29)$$

а интегральное преобразование мнимой составляющей функции отражения $\text{Im}S(x, y)$ соответствует дополнительному преобразованию Хартли [18]

$$OH[\text{Im}S(x, y)] = 2 \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \text{Im}S(x, y) \sin[(\pi/4) - (2\pi/\lambda f)(\mu x + \nu y)] dx dy. \quad (30)$$

Преобразование Хартли вещественной составляющей функции отражения (29) отображается на комплексной плоскости Хартли [18] проекцией на ось R' , а дополнительное преобразование Хартли мнимой составляющей функции отражения объекта (30) отображается на комплексной плоскости Хартли проекцией на вторую ось I' . Таким образом, комплексная функция отражения отображается на комплексной плоскости Хартли проекциями на обе оси [13].

Дополнительное комплексное преобразование Хартли имеет вид

$$OH'[S(x, y)] = -OH[\text{Re}S(x, y)] + H[\text{Im}S(x, y)]. \quad (31)$$

Пара комплексных преобразований Хартли (28) и (31) может быть использована для построения квадратурных составляющих комплексной голограммы Хартли объекта с комплексной функцией отражения, интерференционные компоненты которой записываются в виде

$$\Gamma_{1H}(\mu, \nu) = 2A_{\pi}A_E(\mu, \nu)A_0(\mu, \nu)R^{1/2}\cos[\theta_E(\mu, \nu) + \theta - \theta_1 + \pi/4], \quad (32)$$

$$\Gamma_{2H}(\mu, \nu) = 2A_{\pi}A_E(\mu, \nu)A_0(\mu, \nu)R^{1/2}\sin[\theta_E(\mu, \nu) + \theta - \theta_1 + \pi/4], \quad (33)$$

где $\theta_1(\mu, \nu) = (2\pi/\lambda)(\mu \sin \alpha + \nu \sin \beta)$, A_E и θ_E – амплитуда и фаза дифракционного интеграла Фурье (8). Таким образом, комплексная голограмма Хартли может быть сформирована в схеме формирования комплексной голограммы Фурье, если выполняется фазовое соотношение

$$\theta_{\pi} - \theta_{01} = \pi/4. \quad (34)$$

Структуры интерференционных компонентов комплексной голограммы Хартли имеют вид, аналогичный комплексной голограмме Фурье, с соответствующим сдвигом интерференционных полос на $\pi/4$. В частности, структура вещественной составляющей комплексной голограммы Хартли Γ_{1H} соответствует структуре вещественной части комплексной голограммы Фурье, смещенной по фазе на $\pi/4$ [13, 17]. Экспериментально комплексную голограмму Хартли можно получить в схеме формирования комплексной голограммы Фурье при задании сдвига фазы между падающей и опорной

волнами, равного $\pi/4$ для одной квадратурной составляющей и $3\pi/4$ для второй квадратурной составляющей [13].

При восстановлении изображений по голограммам (32), (33) с помощью преобразования Хартли H и дополнительного преобразования Хартли OH соответственно получим

$$J_1(\xi, \eta) = \text{Re}S(\xi, \eta) - \text{Im}S(-\xi, -\eta), \quad (35)$$

$$J_2(\xi, \eta) = \text{Re}S(\xi, \eta) + \text{Im}S(-\xi, -\eta). \quad (36)$$

Таким образом, свойства комплексных голограмм Хартли существенно отличаются от свойств комплексных оптических голограмм Фурье, по каждой из квадратурных составляющих которых восстанавливаются два одинаковых сопряженных изображения объекта с интенсивностями, соответствующими модулю его коэффициента отражения по интенсивности. Интенсивность "истинного" изображения, восстановленного по каждой квадратурной составляющей комплексной голограммы Хартли, соответствует квадрату модуля вещественной части функции отражения объекта, а интенсивность "сопряженного" изображения – квадрату модуля мнимой составляющей функции отражения объекта.

Предложенный в [13] метод разделения вещественной и мнимой составляющих комплексной функции отражения объекта в плоскости изображения, восстановленного по одной из квадратурных составляющих комплексной голограммы Хартли, был проверен с помощью цифрового моделирования, некоторые результаты которого приведены в [13].

Известно, что по паре квадратурных составляющих комплексной голограммы Фурье (и Френеля) восстанавливается единственное изображение, координаты которого соответствуют координатам исходного объекта, а интенсивность пропорциональна коэффициенту отражения объекта. По паре квадратурных составляющих комплексной голограммы Хартли можно также восстановить единственное изображение, координаты которого соответствуют координатам исходного объекта, а интенсивность пропорциональна квадрату вещественной части функции отражения объекта

$$I(\xi, \eta) = 4|\text{Re}S(\xi, \eta)|^2. \quad (37)$$

Таким образом, с помощью комплексных голограмм Хартли можно получить новую информацию об объекте по сравнению с комплексными голограммами Фурье.

Цифровое моделирование голограмм Хартли и восстановленных по ним изображений включает в себя следующие операции:

1. Задание размеров матрицы голограммы $M \times N$.

2. Задание длины волны излучения λ , дискретных координат краев объекта m_1, m_2, n_1, n_2 и параметров его отражающей поверхности на заданной длине волны – коэффициентов преломления k и поглощения χ .

3. Вычисление комплексного коэффициента отражения поверхности объекта по формуле (17).

4. Задание объектной матрицы и двумерной комплексной функции отражения объекта по формулам (18), (19).

5. Вычисление интерференционной составляющей комплексной голограммы Фурье $\Gamma_\Phi(p, q)$ объекта с помощью алгоритма БПФ (20).

6. Вывод на печать квадратурных составляющих комплексной голограммы Фурье $\text{Re}\Gamma_\Phi(p, q)$ и $\text{Im}\Gamma_\Phi(p, q)$.

7. Вычисление интерференционной составляющей голограммы Хартли

$$\Gamma_X(p, q) = \text{Re}\Gamma_\Phi(p, q) + \text{Im}\Gamma_\Phi(p, q). \quad (38)$$

8. Вывод на печать интерференционной составляющей голограммы Хартли $\Gamma_X(p, q)$.

9. Вычисление преобразования Фурье от функции $\Gamma_X(p, q)$ с помощью алгоритма БПФ

$$\Gamma'(u, v) = F[\Gamma_X(p, q)] \quad (p = 0, \dots, M-1; q = 0, \dots, N-1; u = 0, \dots, M-1; v = 0, \dots, N-1). \quad (39)$$

10. Вычисление поля, формирующего восстановленное изображение

$$J_X(u, v) = \text{Re}\Gamma'(u, v) + \text{Im}\Gamma'(u, v). \quad (40)$$

11. Вычисление интенсивности восстановленного изображения

$$I_X(u, v) = |J_X(u, v)|^2. \quad (41)$$

12. Вывод на печать поля $J_X(u, v)$, формирующего восстановленное изображение, и интенсивности изображения $I_X(u, v)$, восстановленного по голограмме Хартли.

Моделирование квадратурной составляющей (28) двумерной голограммы Хартли проводилось на матрице с размерами 32×32 элемента для объекта в форме буквы "Г", имеющего комплексную функцию отражения $S = 0,5 + i0,25$. На печать выводилась голограмма Хартли $\Gamma_X(p, q)$ (рис. 4а), представляющая собой "вещественную" составляющую комплексной голограммы Хартли (28), и восстановленное по ней изображение $J_X(u, v)$ в символьной (рис. 4б) и цифровой форме. Кроме того, для сравнения проводилось вычисление комплексной голограммы Фурье $\Gamma_\Phi(p, q)$ для того же объекта, вещественная составляющая которой $\text{Re}\Gamma_\Phi(p, q)$ приведена на рис. 4в, и изображения, восстановленного как по комплексной голограмме Фурье, так и

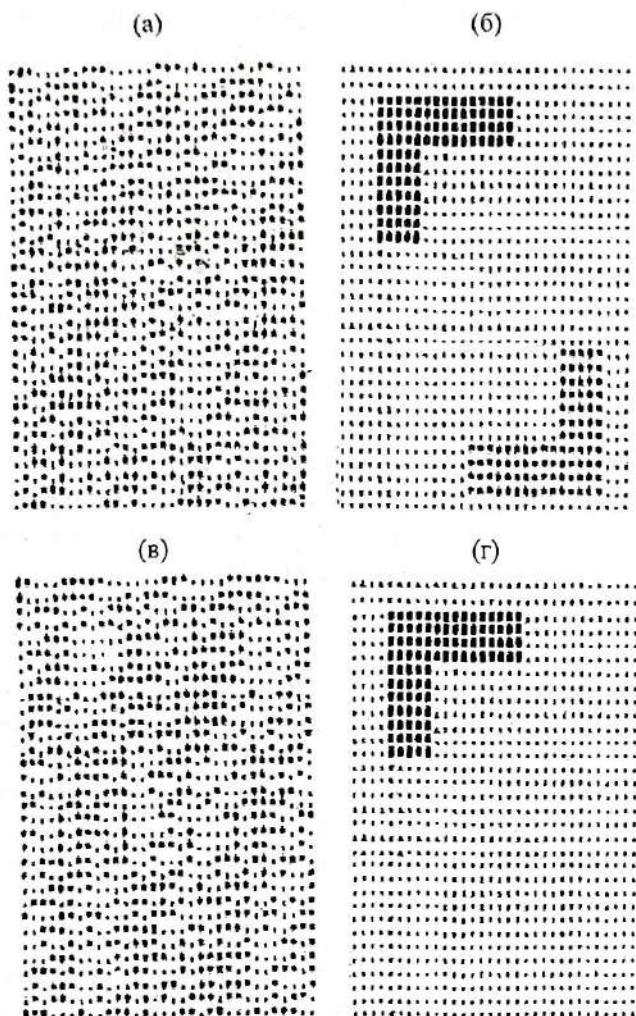


Рис. 4. Цифровые модели голограмм Хартли и Фурье для объекта в форме буквы "Г" с комплексной функцией отражения $S = 0,5 + i0,25$: квадратурная составляющая комплексной голограммы Хартли (а); истинное и сопряженное изображения, восстановленные по одной квадратурной составляющей комплексной голограммы Хартли (б); вещественная составляющая комплексной голограммы Фурье (в); изображение, восстановленное по комплексной голограмме Фурье (г).

по ее вещественной составляющей $\text{Re}\Gamma_{\Phi}(p, q)$ с помощью алгоритма БПФ (рис. 4г). В полном соответствии с предположением Брейсуэлла [17] о структуре голограммы Хартли комплексного объекта полученная нами цифровая модель вещественной составляющей комплексной голограммы Хартли имеет тонкую структуру, практически неотличимую от аналогичной структуры вещественной составляющей комплексной голограммы Фурье того же объекта, но смещенную относительно нее по фазе на величину $\pi/4$.

Как и следует из теоретических предпосылок, при восстановлении по вещественной составляющей комплексной голограммы Хартли были получены два изображения, расположенные симметрично относительно начала координат. Комплексные составляющие полей этих изображений соответ-

ствуют вещественной $\text{Re}S(u, v)$ (более яркое изображение буквы "Г" на рис. 4б) и мнимой $\text{Im}S(u, v)$ (более бледное, зеркально перевернутое изображение буквы "Г" на рис. 4б) составляющим функции отражения объекта. По вещественной составляющей комплексной голограммы Фурье восстанавливались также два изображения – истинное и сопряженное – с одинаковыми комплексными составляющими поля, равными $0,5[\text{Re}S(u, v) + i\text{Im}S(u, v)]$. При восстановлении изображения по комплексной голограмме Фурье получено единственное изображение, расположенное в истинном месте расположения объекта, с комплексной составляющей поля, равной $[\text{Re}S(u, v) + i\text{Im}S(u, v)]$.

Определение оптических характеристик отражающих поверхностей по структурам комплексных голограмм

Для любого объекта с отражающей металлической поверхностью можно сформировать комплексные голограммы Фурье и Френеля, структуры квадратурных составляющих которых являются характерными именно для этой металлической поверхности и зависят от величины изменения фазы поля при отражении от данного материала, что проявляется как в смещении интерференционных полос на голограммах, так и в изменении их макроструктур. С помощью комплексных голограмм Фурье и Френеля можно производить визуальную идентификацию материалов отражающих поверхностей объектов, а также количественно измерять оптические постоянные.

Как показано в [3], интерференционные компоненты квадратурных составляющих комплексной голограммы Γ_1 и Γ_2 , которые описываются соотношениями (9), (10), можно получить из экспериментально измеренных значений прозрачности голограммы, исключая из них значения интенсивности опорного пучка и фотографических составляющих, которые измеряются по отдельности перед формированием комплексной голограммы. Для определения R и θ по вычисленным значениям Γ_1 и Γ_2 необходимо компенсировать амплитудные и фазовые распределения в падающем и опорном пучках и в дифракционном поле. Для этого в [3] предложено формировать в этой же схеме квадратурные составляющие комплексной голограммы эталонного непоглощающего объекта, имеющего ту же форму и размеры, что и исследуемый объект, известные значения коэффициента отражения R_3 и изменения фазы при отражении θ_3 . Интерференционные компоненты Γ_{13} и Γ_{23} квадратурных составляющих комплексной голограммы эталонного объекта записываются аналогично выражениям (9) и (10).

Измерив значения Γ_1 , Γ_2 , Γ_{13} и Γ_{23} в идентичных точках комплексных голограмм исследуемого и эталонного объектов, можно получить значения коэффициента отражения R и изменения фазы когерентного оптического излучения при отражении от объекта θ [3]:

$$R = R_3(\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2)/(\Gamma_{13}^2 + \Gamma_{23}^2), \quad (42)$$

$$\theta = \arctg[(\Gamma_2\Gamma_{13} - \Gamma_1\Gamma_{23})/(\Gamma_1\Gamma_{13} - \Gamma_2\Gamma_{23})] + \theta_3, \quad (43)$$

а с помощью известных соотношений [19] – значения оптических характеристик k и χ для материалов отражающих поверхностей исследуемых объектов.

При анализе структур комплексных голограмм Хартли также можно определять “интегральные” (т. е. характеризующие весь объект в целом) комплексные коэффициенты отражения по формулам (42), (43).

Выводы

1. Квадратурные составляющие оптических комплексных голограмм Фурье и Френеля формируются на двух разнесенных в пространстве плоскостях с помощью двух когерентных опорных линейно поляризованных волн, фазы которых отличаются на $\pi/2$.

2. Комплексная голограмма Хартли может быть получена в схеме формирования комплексной голограммы Фурье при задании сдвига фазы между падающей и опорной волнами, равного $\pi/4$ для одной квадратурной составляющей и $3\pi/4$ – для второй квадратурной составляющей.

3. Применение комплексных голограмм позволяет получать дополнительную информацию об объектах по сравнению с обычными методами формирования голограмм (в виде одной из квадратурных составляющих). По комплексной голограмме можно получать информацию о комплексном коэффициенте отражения объекта. Причем коэффициент отражения и изменение фазы когерентного оптического излучения при отражении от объекта можно определять не только по восстановленному изображению, но и при анализе структуры регистрируемых квадратурных составляющих комплексной голограммы.

4. Для объекта с отражающей металлической поверхностью могут быть сформированы комплексные голограммы Фурье, Френеля или Хартли, структуры квадратурных составляющих которых являются характерными именно для этой металлической поверхности и зависят от величины изменения фазы поля при отражении от данного материала, что проявляется как в смещении интерференционных полос на голограммах, так и в изменении их макроструктур. С помощью таких комплексных голо-

грамм можно проводить визуальную идентификацию материалов отражающих поверхностей объектов, а также измерять оптические постоянные количественно.

5. Цифровые модели голограмм или дифракционных картин в виде символьных распределений интенсивности зарегистрированных голограмм можно рассматривать в качестве аналога регистрируемых в оптике на фотопластинках (или других фотоприемных устройствах) голографических структур в виде почернения фотослоя.

6. При восстановлении изображения по каждой из квадратурных составляющих комплексной голограммы Хартли изображение голографируемого объекта разделяется на два: первое, расположенное в месте истинного положения объекта, соответствует вещественной части его функции отражения $\text{Re}S$, а второе, расположенное в сопряженных точках по другую сторону начала координат, – мнимой части функции отражения объекта $\text{Im}S$. Это свойство голограмм Хартли и восстановленных по ним изображений может быть использовано для получения значений $\text{Re}S$ и $\text{Im}S$ с целью последующего вычисления по ним значений оптических характеристик поверхности объекта.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору В.К. Милославскому за проявленный интерес к работе и ценные замечания, высказанные при обсуждении результатов, а также Е.Я. Томчук за цифровое моделирование голограмм Хартли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
2. Богданова Т.В., Сафронов Г.С., Титарь В.П. // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. “Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля”. Ч. 2. Минск, 1989. С. 141.
3. Богданова Т.В., Титарь В.П. // Тр. XXV школы-симпозиума по когерентной оптике и голографии. Ярославль, 1997. С. 70–81.
4. Титарь В.П., Богданова Т.В. // Вестн. Харьков. ун-та. Сер. “Радиофизика и электроника”. 1998. № 405. С. 65–70.
5. Сафронов Г.С., Сафронова А.П. Введение в радиоголографию. М.: Сов. радио, 1973. 288 с.
6. Бахрах Л.Д., Курочкин А.П. Голография в микроволновой технике. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
7. Богданова Т.В., Сафронов Г.С. и др. // Голографические методы в науке и технике / Под ред. Скроцкого Г.В. и др. Л.: ФТИ, 1985. С. 12–25.
8. Сафронов Г.С., Торкатюк М.Т. // Радиотехн. и электрон. 1979. Т. 24. № 8. С. 1542–1547.

9. Богданова Т.В., Сафронов Г.С., Титарь В.П. // Радиотехн. и электрон. 1990. Т. 35. № 8. С. 1720–1730.
10. Дешамп Г.А. // ТИИЭР. 1967. Т. 55. № 4. С. 102–104.
11. Сафронов Г.С., Титарь В.П., Томчук Е.Я. // Радиотехн. и электрон. 1981. Т. 26. № 1. С. 728–732.
12. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику: Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 364 с.
13. Богданова Т.В., Титарь В.П., Томчук Е.Я. // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. № 6. С. 1039–1046.
14. Федоров Б.Ф., Эльман Р.И. Цифровая голография. М.: Наука, 1975. 152 с.
15. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. М.: Наука. 1982. 142 с.
16. Титарь В.П., Богданова Т.В. // Вісник Харків. ун-ту. 1999. № 423. Сер. "Радіофіз. та електрон. В. 1. С. 183–193.
17. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 175 с.
18. Bracewell R.N. // J. Atmospheric and Terrestrial Phys. 1989. V. 51. № 9/10. P. 791–795.
19. Кизель В.А. Отражение света. М.: Наука, 1973. 351 с.