

Ероховец В. К., зав. лабораторией ОИПИ НАН Беларуси

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ

The holographic identifiers analysis was put into practice by estimation at reproducible protective elements brightness and contrast. Preference of the hologram record with use of negative underlines adaptation was shown. The graph-analytic method of calculation and choice of holographic identifiers parameters was developed.

**Введение.** Одним из общепризнанных подходов к оценке качества воспроизведения информационного изображения является *кибернетический* [1]. Он учитывает содержание и количество информации, воздействующей на зрительный анализатор. Прием визуальной информации вызывает у наблюдателя адекватную оценку качества воспроизводимого изображения [2]. Оценка качества формализована функционалом из множества функций, соответствующих параметрам изображения. Нужно установить параметры изображения, влияющие на качество воспроизведения, и для каждого из них определить сенсорную характеристику. Число таких параметров невелико, это: размер (формат), точность воспроизведения контуров (нелинейные искажения), объемность (объемные искажения), резкость (четкость), яркость, контраст, цветность, воспроизведение полутонов и чистота фона.

Средства считывания голографической информации должны удовлетворять ряду требований, основные из которых в концентрированной форме можно сформулировать как обеспечение заданного формата воспроизведения документальной страницы с достаточной точностью и требуемого качества. Информационные и геометрические аспекты проектирования голографических идентификаторов были изложены в работах [3, 4]. Частные вопросы анализа энергетических характеристик рассматривались в [5, 6].

В настоящей работе производится обобщенная оценка яркостных и контрастных характеристик при воспроизведении документальной информации с голограмм и предлагается графо-аналитическая методика их расчета. При этом учтены фоновые составляющие, порождаемые голограммой, заполнение документа информационными элементами, контраст транспаранта и характеристики проекционных экранов (дисплеев).

### 1. Яркостно-контрастные характеристики.

Мощность восстановленного с голограммы пучка когерентного света  $P_I$  является суммой двух компонент: информационной  $P_C$  и фоновой  $P_\Phi$ . Значения этих компонент определяются дифракционной эффективностью  $\eta$ , суммарным коэффициентом фона  $k_\Phi$  и мощностью считывающего пучка света  $P_R$

$$P_I = P_C + P_\Phi = \eta P_R = P_C + k_\Phi P_R, \quad (1)$$

откуда

$$P_C = P_R(\eta - k_\Phi). \quad (2)$$

Основными составляющими суммарного фона являются: фон рассеяния и дифракционный фон, интермодуляционные и корреляционные шумы, перекрестные помехи и т.д. Оценку контраста будем производить по освещенности экрана в информационных и фоновых участках, используя для обратного контраста выражение

$$K_O = 1 - \frac{E_\Phi^O}{E_C^O}, \quad (3)$$

а для прямого контраста —

$$K_\Pi = 1 - \frac{E_C^\Pi}{E_\Phi^\Pi} \quad (4)$$

При воспроизведении голограмм, записанных с использованием негативных транспарантов, получают обратный контраст. При этом весь свет с мощностью  $P_C$ , сосредотачиваясь на информационных участках экрана  $S_C = S_\Omega k_3$ , с точностью до постоянного коэффициента создаст освещенность

$$E_C^O = \frac{P_C}{S_\Omega} \cdot \frac{\eta - k_\Phi}{k_3}, \quad (5)$$

где  $k_3$  — коэффициент заполнения документа информационными элементами.

Свет фона равномерно распределяется по экрану и создает освещенность фона

$$E_\Phi^O = \frac{k_\Phi P_R}{S_\Omega}. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) выражение (3) примет вид

$$K_O = \frac{\eta - k_\Phi}{\eta - k_\Phi(1 - k_3)}. \quad (7)$$

При воспроизведении же голограмм, записанных с использованием позитивных транспарантов, получают прямой контраст. В этом случае освещенность, создаваемая результи-

рующим фоном, соответствует освещенности информационных элементов документа, а весь продифрагированный свет идет на создание более яркого фона в воспроизводимом документе

$$E_{\Phi}^{\Pi} = \frac{P_R}{S_{\Sigma}} = \frac{\eta - k_{\Phi}}{1 - k_3} + E_C^{\Pi}, \quad (8)$$

откуда

$$K_{\Pi} = \frac{\eta - k_{\Phi}}{\eta - k_3 k_{\Phi}}. \quad (9)$$

Графики функций  $K_0$  и  $K_{\Pi}$  для голограмм с  $\eta = 0,15$  показаны на рис. 1, а выигрыш в яркости и контрасте достигаемый за счет применения негативных транспарантов, иллюстрируется графиками на рис. 2.

$$V_{Я} = \frac{E_C^O}{E_{\Phi}^{\Pi}} = \frac{[\eta - k_{\Phi}(1 - k_3)](1 - k_3)}{k_3(\eta - k_{\Phi}k_3)}, \quad (10)$$

$$V_K = \frac{K_0}{K_{\Pi}} = \frac{\eta - k_{\Phi}k_3}{\eta - k_{\Phi}(1 - k_3)}, \quad (11)$$

Видно, что вплоть до значения  $k_3 = 0,5$  яркостный контраст изображений, восстанавливаемых с голограмм, запись которых производится с негативных транспарантов, превышает контраст изображений, восстанавливаемых с голограмм, записанных с применением позитивных транспарантов.

Учитывая, что при контрасте ниже 0,65 существенно ухудшаются условия работы оператора, увеличивается время восприятия информации и число ошибок при считывании [7], наиболее предпочтительной оказывается запись голограмм с негативных транспарантов. Изображения скрытых ненасыщенных объектов, восстановленных с таких голограмм обладают в 1,5–2,5 раза большим контрастом и в 5–15 раз большей яркостью, что особенно важно для применения в аппаратуре воспроизведения малогабаритных лазеров с низкой выходной мощностью.

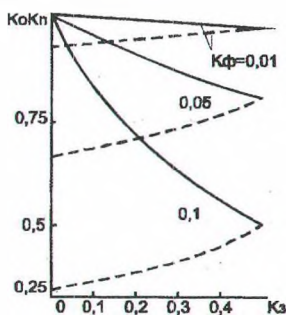


Рис. 1. Контраст воспроизводимых изображений с голограмм, записанных с негативных (сплошная кривая) и позитивных (штриховая кривая) транспарантов

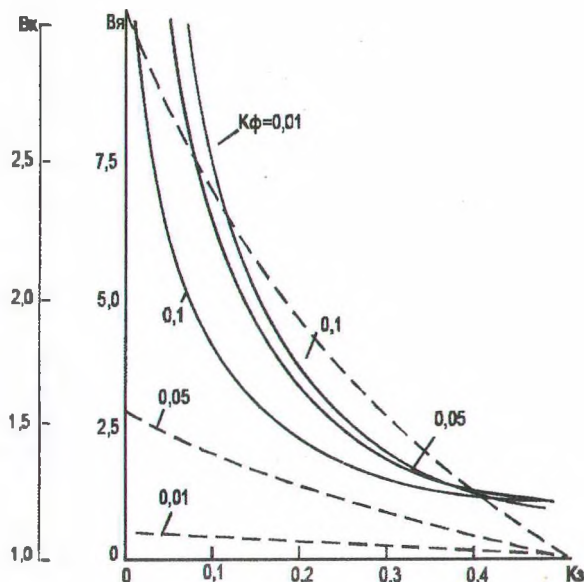


Рис. 2. Выигрыш в яркости  $V_{Я}$  (сплошная кривая) и в контрасте  $V_K$  (штриховая кривая) для воспроизводимых изображений, достигаемый за счет применения негативных транспарантов

При проведении анализа предполагалось, что используемые на этапе записи транспаранты имеют высокий амплитудный контраст, близкий к единице. При практическом изготовлении транспарантов (например, микрофильмированных) высокий контраст может быть получен лишь при использовании документов, выполненных тушью на материале с высоким коэффициентом яркости. Однако оптическая плотность вуали и ограниченная максимальная оптическая плотность информационных элементов документа [8] снижают реальные контрастные параметры микрофильмирования транспарантов.

Представим интегральный коэффициент пропускания транспаранта в когерентно-оптической системе как отношение светового потока на выходе транспаранта к его значению на входе

$$\chi = \chi_{\max} k_3 + \chi_{\min} (1 - k_3), \quad (12)$$

где  $\chi_{\max}$  — прозрачность транспаранта в области информационных элементов, а  $\chi_{\min}$  — в области неинформационных элементов (в области фона).

При этом яркостный контраст, создаваемый когерентно-оптической системой в плоскости экрана, можно представить в виде

$$K_0 = 1 - \frac{\chi_{\min}}{\chi_{\max}}, \quad (13)$$

т. е. значение  $K_0$  определяется только контрастом применяемых транспарантов и не зависит от коэффициента заполнения  $k_3$  информационными элементами поля транспаранта.

Голограмма, записанная с применением такой когерентно-оптической системы, при ее воспроизведении осуществляет перераспределение информационной составляющей восстановленного света. В соответствии с (12) информационная компонента в сравнении с (2) уменьшается и определяется относительной прозрачностью информационных элементов поля транспаранта, т. е.

$$P_c = \frac{(\eta - k_3) \chi_{\max} k_3}{\chi_{\max} k_3 + \chi_{\min} (1 - k_3)} P_R, \quad (14)$$

а остальная часть энергии света, соответствующая фону транспаранта, добавляется к составляющим фона, порождаемым самой голограммой, т. е.

$$P_\Phi = \frac{k_\Phi \chi_{\max} k_3 + \eta \chi_{\min} (1 - k_3)}{\chi_{\max} k_3 + \chi_{\min} (1 - k_3)} P_R. \quad (15)$$

При таком распределении энергии света контраст определяется соотношением

$$K_0 = \frac{(\eta - k_\Phi) [1 - (1 - k_3) \chi_{\min} / \chi_{\max}]}{[\eta - k_\Phi (1 - k_3)] + (1 - k_3) k_\Phi \chi_{\min} / \chi_{\max}}. \quad (16)$$

На рис. 3 показаны зависимости контраста  $K_0$  от коэффициента заполнения  $k_3$  транспаранта информационными элементами при различных значениях  $\chi_{\min} / \chi_{\max}$  транспаранта и при  $\eta = 0,2$  и  $k_\Phi = 0,1$ . Видно, что при  $\chi_{\min} = 0$  выражение (16) приводится к форме (7) и с увеличением соотношения  $\chi_{\min} / \chi_{\max}$ , т. е. при уменьшении контраста применяемых транспарантов, контрастные характеристики воспроизводимого изображения резко ухудшаются.

Для устранения этого недостатка предпочтительно преобразование слабого амплитудного контраста в хорошо видимый контраст интенсивности изображения за счет низкочастотной заграждающей фильтрации с коэффициентом ослабления  $0 \leq t \leq 1$  в спектральной плоскости. При этом составляющая фона подавляется в  $t^{-1}$  раз, и для когерентно-оптической системы с фильтром

$$K_0 = 1 - \frac{t \chi_{\min}}{\chi_{\max}}. \quad (17)$$

При воспроизведении голограмм, запись которых производится с применением заграждающего фильтра, формула для оценки контраста в сравнении с (16) также претерпевает изменения.

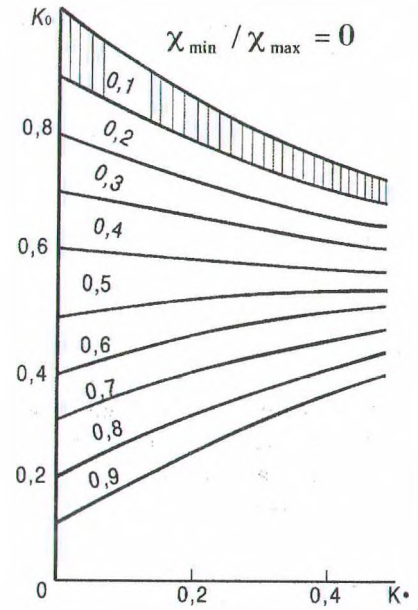


Рис. 3. Контрастные характеристики изображений, воспроизводимых с голограмм, запись которых производится с применением низкочастотных негативов без фильтрации и низкочастотной заграждающей фильтрации (заштрихованная область)

$$K_0 = \frac{(\eta - k_\Phi) [1 - (1 - k_3) t \chi_{\min} / \chi_{\max}]}{[\eta - k_\Phi (1 - k_3)] + (1 - k_3) k_\Phi t \chi_{\min} / \chi_{\max}}. \quad (18)$$

Как видно из (18), при  $t < 1$  достигается очень сильный контраст, даже когда значения информационных приращений очень малы и в предельном случае при  $t \rightarrow 0$  контраст  $K_0 = 1$ . Достижение же максимального контраста при воспроизведении ограничивается собственными фоновыми составляющими, порождаемыми голограммой. При этом формула (18) преобразуется к виду (7) при любом соотношении  $\chi_{\min} / \chi_{\max}$ .

Рассмотренный случай локализации фоновой составляющей света в математической точке является лишь теоретической идеализацией реального процесса дифракции когерентного света на апертуре фильмового окна. При расчете размеров заграждающего фильтра по энергетическому коэффициенту  $\eta$ , [9] более высокочастотные компоненты света, относительная суммарная энергия которых составляет  $1 - \eta = t_0$ , проходят фильтр и несколько ослабляют контраст. Считая распределение прошедших компонент света в выходной плоскости равномерным, параметр  $t$  в (18) для оценки яркостного контраста изображений, воспроизводимых голограмм, необходимо заменить на  $t_0$ . Так, при  $t_0 = 0,1$  для тех же значений  $\eta = 0,2$  и  $k_\Phi = 0,1$  на рис. 3 штриховкой представлена область  $K_0 = f(k_3)$  при изменении зна-

чения  $\chi_{\min} / \chi_{\max}$  от 0,1 до 0,9. Видно, что применение низкочастотной заграждающей фильтрации в плоскости Фурье-преобразования на этапе записи голограмм значительно повышает яркостно-контрастные характеристики при их воспроизведении и уменьшает динамический диапазон контраста. Дальнейшее повышение контраста за счет расширения полосы заграждающей фильтрации необходимо связывать с допустимыми искажениями элементарных сигналов, из которых строится модель документа.

**2. Методика расчета энергетических характеристик.** Регистрация голограмм скрытого изображения может производиться как по схеме Лейта (с ее записью по всей площади голографической марки), так и по схеме с Фурье — преобразованием и ее записью в виде микроголограммы с диаметром  $\approx 0,5 \div 2$  мм локализованной в заданном месте голографической марки. При выборке информации пучок когерентного света дифрагирует на интерференционных решетках требуемой голограммы и дифрагированные пучки света строят в плоскости диффузного экрана изображение.

Задача данного раздела по своей сути сводится к выводу соотношений для определения мощности лазера, обеспечивающей заданные яркостно-контрастные характеристики при воспроизведении голографической информации. Предполагается, что расчет и выбор геометрических параметров системы запись-воспроизведение завершены.

Номинальные значения энергетических характеристик определяются рядом факторов: информационными и энергетическими параметрами голограмм, паразитными засветками экрана, коэффициентом отражения и поглощения просветного экрана, выбором прямого или обратного контраста, затемненностью помещения для эксплуатации технических средств и т. д.

При записи и воспроизведении изображений и обратном контрасте, когда весь продифрагировавший на голограмме свет идет на построение информационных элементов, наилучшим условиям зрительного восприятия соответствуют значения контраста от 0,65 до 0,94 [7]. При этом высокого контраста следует избегать, так как информационные элементы при восприятии кажутся яркими источниками света и возникающие при этом ощущения ослепления значительно уменьшают их различимость. Это явление можно исключить за счет уменьшения яркости изображения в целом или в простейшем случае — частичной подсветкой экрана со стороны оператора.

Для воспроизведения голографической информации человеку-оператору предпочтитель-

нее использовать проекцию в проходящем свете с применением направленно-рассеивающих пропускающих экранов. Выбор такого вида проекции позволяет в незатемненных помещениях получать достаточно качественные изображения документов с относительно высокими яркостно-контрастными характеристиками даже при низких значениях лазерной мощности.

Определенные характеристики экрана, такие, как малый коэффициент отражения при наблюдении в дневном свете или большой коэффициент яркости, позволяют удовлетворять специальным требованиям или конкретным условиям. Кроме того, выбор проекции на просвет может диктоваться необходимостью свободного доступа к экрану со стороны оператора или соображениями размещения проекционного оборудования.

Назначение проекционного экрана состоит в восприятии света, поступающего от матрицы голограмм, в рассеянии и излучении рассеянного света в форме видимого изображения. Соответствие между освещенностью и яркостью экрана количественно может быть описано известным выражением

$$B_c = \frac{V_{\max} k_\lambda r_y}{\pi} E_c^0, \quad (19)$$

где  $V_{\max} = 683$  лм/Вт — световой эквивалент лучистого потока;  $k_\lambda$  — коэффициент относительной видимости;  $r_y$  — коэффициент яркости экрана в сравнении с ламбертовским экраном.

При оценке фоновой составляющей полагаем, что паразитная подсветка с внутренней стороны экрана отсутствует, и контраст для выбранного вида проекции можно найти из соотношения (16). Для практического определения контраста целесообразно использование графиков на рис. 3.

Ограничения технического и экономического порядка, как правило, заставляют конструкторов принимать в качестве приемлемого уровня яркости  $B_c$  воспроизводимых изображений ее минимальное значение и по нему с учетом (5), (14) и (19) выбирать лазер с мощностью излучения:

$$P_R \geq \frac{\pi S_c B_c}{V_{\max} k_\lambda r_y} \left[ \frac{\eta - k_\Phi}{k_3 + (1 - k_3) t_0 \chi_{\min} / \chi_{\max}} + k_\Phi \right]^{-1} \quad (20)$$

Как видно из (20), яркость воспроизводимы изображений обусловлена не только удельным световым потоком, но и свойствами экрана, основным критерием качества которого можно выбрать взаимосвязь между максимальным значением коэффициента яркости  $r_{y \max}$ , углом рассеяния  $\varphi_p$  и коэффи-

коэффициентом отражения  $k_0$ . Кривые такого рода взаимосвязи, полученные при практическом исследовании большого числа экранов [10], приведены на рис. 4 для значений коэффициента яркости, составляющих 50 и 33% максимальных  $r_{я}$ , а также для коэффициента отражения  $k_0$ .

Известная практика уменьшения коэффициента отражения за счет ввода в состав экрана черного или серого красителя с целью воспроизведения относительно небольших изображений при дневном свете для варианта голографического дисплея нерациональна, поскольку добавление темных красителей эквивалентно уменьшению максимального значения коэффициента яркости при сохранении неизменным угла рассеяния. Для эффективного уменьшения коэффициента отражения и, как следствие, повышения контрастности изображения в хорошо освещенных помещениях при воспроизведении голографической информации наиболее целесообразно применять светофильтр с минимальным показателем поглощения на длине волны используемого света, расположенный рядом с диффузным экраном со стороны оператора.

При использовании гелий-неонового лазера наилучшими светофильтрами являются ОС-12 – ОС-17.

Коэффициент яркости такого экрана практически не уменьшается, а низкий коэффициент отражения внешнего освещения значительно улучшает условия восприятия изображения оператором.

При выборе экрана следует нарисовать схематический план устройства воспроизведения (рис. 5) с изображением на нем матрицы голограмм (Г), диффузного экрана (ДЭ) и места оператора (О).

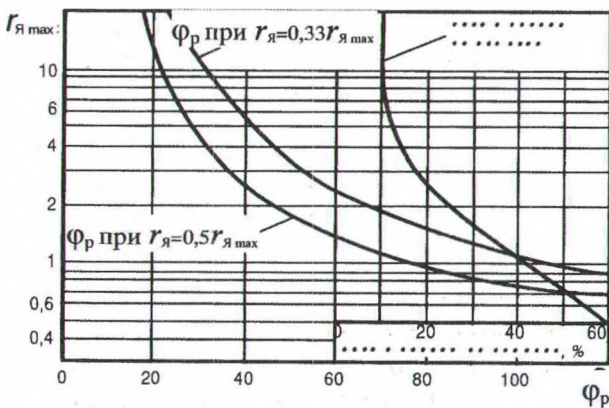


Рис. 4. Взаимосвязь между максимальным значением коэффициента яркости, углом рассеяния и коэффициентом отражения

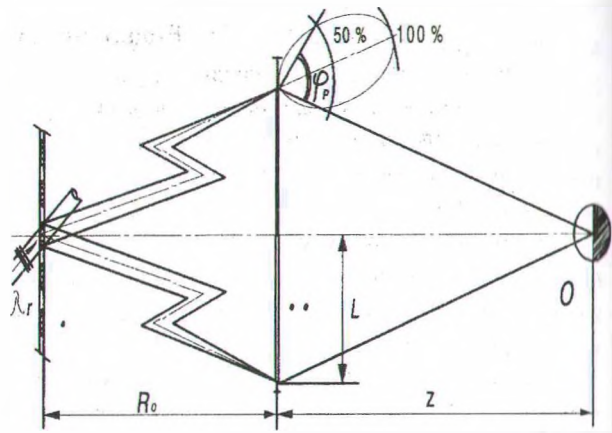


Рис. 5. Схема для расчета яркостных характеристик при воспроизведении голографической информации

Линия, проведенная с места наблюдения к краю проецируемого на экран изображения, определяет половину угла рассеяния экрана:

$$\frac{\varphi_p}{2} = 2\pi - \text{Arctg} \frac{R_0}{L} - \text{Arctg} \frac{z}{L}. \quad (21)$$

Определив  $\varphi_p$  и учитывая тот факт, что двукратное изменение яркости в плоскости экрана оказывается совершенно незаметным, а для большинства наблюдателей трехкратное изменение яркости является удовлетворительным, характеристики экрана с таким углом рассеяния можно найти, используя 50%-ную или 33%-ную кривую на рис. 4. При расчете устройства воспроизведения группового пользования оценку  $r_{я}$  необходимо производить от самого крайнего места наблюдения.

Яркостные характеристики можно повысить, применяя длиннофокусный объектив записи. При этом угол рассеяния уменьшается, что соответствует возможности роста коэффициента яркости экрана. Однако при этом необходимо идти на компромисс в силу неизбежного снижения плотности записи.

Наконец, последним существенным фактором для снижения мощности пучка считывающего света и обеспечения требуемых энергетических характеристик является выбор длины волны излучения с максимально возможным коэффициентом видности  $k_\lambda$ .

Среди существующих источников наиболее подходящим с этой точки зрения является лазер с выделением линии  $\lambda_R = 0,5145$  мкм, для которой  $k_\lambda = 0,6$ .

Для примера расчета энергетических характеристик при воспроизведении документов с параметрами  $z = 600$  мм,  $L^{11} = 150$  мм и  $R_0^{11} = 510$  мм (формат 12) воспользуемся схемой на рис. 5. По формуле (21) определяем значение угла рассеяния

$\varphi_p^{11} = 62^\circ$  и  $\varphi_p^{12} = 99^\circ$ . Соответствующие значения максимальной яркости экрана  $r_{я\max}^{11} = 2,0$  и  $r_{я\max}^{12} = 1,2$ , а также значения минимальной яркости на краях экрана:  $r_{я}^{11} = 0,66$  и  $r_{я}^{12} = 0,4$  определяем по 33%-ой кривой графика на рис. 4.

Полагая, что транспаранты документов подготавливаются на фотопленке типа «Микрат-300» с параметром  $t_o \chi_{\min} / \chi_{\max} = 0,01$ , и положив в качестве исходных параметров  $\eta = 0,2$ ;  $B_c = 50$  нТл;  $\lambda_R = 0,5145$  мкм;  $k_s = 0,05$  и  $k_\phi = 0,01$ , по формуле (21) получаем  $P_R^{11} = 9,6$  мВт и  $P_R^{12} = 32$  мВт.

**Заключение.** Получены соотношения для оценки яркости и контраста воспроизводимых защитных элементов, показывающие предпочтительность записи голограмм с применением негативных транспарантов.

Воспроизводимые изображения с таких голограмм обладают в 1,3–2 раза большим контрастом и в 5–15 раз большей яркостью, что особенно важно для работы в условиях дневного освещения и с точки зрения применения в составе голографических идентификаторов малогабаритных лазеров с низкой выходной мощностью. Результаты разработанной графоаналитической методики расчета энергетических характеристик показывают, что снижение освещенности и, как следствие, яркости диффузного экрана является основной причиной невозможности увеличения масштаба воспроизводимых документов по классической схеме восстановления свыше А3–А4 формата по ЕСКД.

## Литература

1. Антипин М. В. Интегральная оценка качества телевизионного изображения. — Л.: Наука, 1970.
2. Комар В. Г. Сравнительная оценка традиционных киноплёночных и электронных систем кинематографа // ТКТ, 2001. — № 1. — С. 14–17.
3. Ероховец В. К. Синтез защитных голограмм со скрытыми изображениями // В кн.: Анализ цифровых изображений. — Мн.: ОИПИ НАНБ, 2002. — Вып. 1. — С. 92–98.
4. Ероховец В. К. Геометрический анализ идентификаторов защитных голограмм // Анализ цифровых изображений. — Мн.: ОИПИ НАНБ, 2003. — Вып. 2. — С. 107–116.
5. Вагин Л. Н., Макарова Л. Т. Определение яркости голографического изображения // Оптико-механическая промышленность. 1978. — № 11. — С. 16–18.
6. Ярмош Н. А., Ероховец В. К. О выборе транспарантов для голографирования документации // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1977. — № 1. — С. 82–86.
7. Мясоедов П. Г., Соколов А. Ф. Отображение информации. — М.: Воениздат, 1971. — 262 с.
8. Гришин Н. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматизированный ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. — М.: Энергия, 1978. — 151 с.
9. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ярмош Н. А. Оценка высших пространственных частот при голографической микрозаписи текстурных документов // Фотометрия, 1983. — № 4. — С. 80–85.
10. Влахов П. Фильмопроекторные системы // Техника систем индикации. — М.: Мир, 1970. — С. 338–386.