

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В МИКРОСКОПЕ

© 2009 г. М. А. Волкова\*; А. А. Литвинович\*; К. И. Мельников\*;  
С. Н. Натаровский\*\*, доктор техн. наук

\* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики, Санкт-Петербург

\*\* ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Рассмотрена возможность использования методики профессора Русинова М.М. и ее модификации для оценки качества изображения по пограничной кривой в микроскопии. Показана простота и перспективность рассмотренной методики.

*Ключевые слова:* качество изображения в микроскопах.

Коды OCIS: 220.0220.

Поступила в редакцию 02.05.2009.

На различных стадиях от разработки до изготовления микроскопа выполняется оценка качества создаваемого им изображения. Например, по качеству изображения точечного объекта в цеховых условиях судят о качестве сборки микрообъектива и проводят ее коррекцию. Цеховой контроль осуществляется по изображениям тест-объектов – мирам, точкам, большой группе точек, расположенных хаотично на непрозрачном фоне – “звездному небу”, шпальными мирам с неровными краями – “рвань” и пр. Контроль проводится визуально, что предопределяет его субъективный характер. Тест-объекты, такие как “звездное небо” и “рвань”, которые изготавливаются на “ЛОМО”, также должны быть аттестованы, а аттестация базируется на визуальной оценке возможности их использования при контроле микрооптики.

На стадии приемки изделия техническим контролером часто используется метод сравнения с эталонным образцом микрообъектива или микроскопа. При этом все опять сводится к визуальной оценке качества изображения тест-объекта, которое для испытуемого образца должно быть не хуже, чем для эталонного. Здесь возможна ошибка интерпретации наблюдаемой картины.

В статье рассматривается возможность использования телевизионного (ТВ) метода регистрации изображения тестового объекта в виде края полуплоскости с последующей его компьютерной обработкой для получения комплексной оценки качества изображения в микроскопе с целью устранения субъективизма в его оценке.

Известно [1–7], что производная функции светораспределения в изображении края полуплоскости (пограничная кривая) дает функцию рассеяния линии (ФРЛ). Свертка ФРЛ с идеальным изображением шпальной или синусоидальной миры дает их изображение в реальной системе. По ним можно построить график функции передачи модуляции (ФПМ), “плоский” вариант которой может быть получен также в результате фурье-преобразования ФРЛ. Суммирование двух сдвинутых друг относительно друга ФРЛ позволяет определить разрешающую способность, а через интегрирование ФРЛ определяется функция концентрации энергии (ФКЭ) в изображении линии и пр. Сравнение полученной ФРЛ с ее идеальным образом с учетом закона сохранения энергии дает информацию о числе Штреля, что в свою очередь дает возможность судить о среднеквадратической деформации волнового фронта.

Все эти характеристики могут быть получены для разных точек поля, в различных сечениях и для различных длин волн, что и заставляет обратить внимание на пограничную кривую для исследования качества изготовления микрооптики и качества изображения.

Работая с ТВ изображением, необходимо понимать, что оно всегда существенно хуже изображения в визуальном канале микроскопа; пограничная кривая характеризует качество изображения сложной системы, включающей в себя, помимо контролируемого изделия (например микрообъектива), еще и вспомогательный микроскоп, телекамеру, канал связи и пр. На

рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема измерительной установки.

Известно использование метода оценки качества изображения по пограничной кривой [6, 7], а также по изображению щели конечной ширины [8, 9]. В [6] описан графоаналитический способ, суть которого заключается в сдвиге пограничной кривой на ширину шпалы меры Фуко. Меняя значения сдвига, можно, не имея реальных шпалльных мири, построить их изображения с последующим вычислением контраста в их изображении и построением кривой, определяющей передачу контраста в полосе частот в соответствии с шагом указанных мири. В [8] подробно рассмотрены вопросы учета влияния фотоприемника (линейного ПЗС). В качестве тест-объекта использовалась щель конечной ширины, что потребовало также рассмотреть вопрос о выборе ее ширины с учетом увеличения вспомогательного микрообъектива. Перечисленные обстоятельства позволяют в настоящей работе не касаться указанных вопросов.

При выборе характеристик вспомогательного микроскопа (его увеличения  $\beta_1$  и передней апертуры  $A_B$ ) следует стремиться к тому, чтобы его работа в схеме не отразилась сильно на результатах измерения. Для реализации этого условия воспользуемся таблицами Л. Джонса [10] и рекомендациями Д.С. Волосова [11], согласно которым для уверенного восприятия структуры изображения ТВ канала на минимальный элемент указанной структуры должно приходиться 12–15 ТВ линий, или пикселов. В нашем случае минимальным элементом структуры  $\Delta\rho$  является расстояние между максимумами в суммарном изображении двух сдвинутых относительно друг друга ФРЛ, значение которого в нашем случае определится как одна оптическая единица, равная  $\lambda/2A'_i$ , где  $A'_i$  – задняя апертура измеритель-

ной установки, которая может быть вычислена по формуле

$$A'_i = \frac{\lambda}{30\delta}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны,  $\delta$  – ширина ТВ линии, или размер пикселя.

Общее увеличение всей установки  $\beta = \beta_i\beta_B$ , где  $\beta_i$  – увеличение испытуемой системы,  $\beta_B$  – увеличение вспомогательного микроскопа. Одновременно для  $\beta$  справедлива формула  $\beta = A/A'_i$ , где  $A$  – передняя апертура испытуемой системы, откуда, если принять  $\lambda = 600$  нм,  $\delta = 6$  мкм, получим, что  $\beta = 300 A$ . Для определения передней апертуры вспомогательного микроскопа введем условие, что он не должен изменять значение ФПМ испытуемой системы  $T_i$  более чем на  $\Delta T$ , например на 5%. Для  $\Delta T$  можно написать

$$\Delta T = \frac{T_i - T_i T_B}{T_i} = 1 - T_B, \quad (2)$$

где  $T_i$ ,  $T_B$  – ФПМ испытуемой системы и вспомогательного микроскопа.

Примем для  $T_B$  треугольную аппроксимацию, тогда  $T_B = 1 - |N|/N_0$ , откуда  $\Delta T = |N|/N_0$ , где  $N$ ,  $N_0$  – пространственная частота и предельная пространственная частота. Легко показать, что  $\Delta T = A'/A_B$ , откуда

$$A_B = A'/\Delta T, \quad (3)$$

где  $A'$  – задняя апертура испытуемой системы.

Например, для объектива с  $\beta_i = 5$  и  $A = 0,1$  получим  $\beta = 30$ ,  $\beta_B = 6$ ,  $A_B = 0,4$  и  $A'_i = 0,083$ .

Считая оптическую систему линейной относительно синусоидального сигнала на входе, в плоскости изображения вспомогательного микроскопа  $M$  (рис. 1) получим синусоидальное распределение с шагом  $1/N'$ . Считая телекамеру (ТК) также линейным элементом схемы, на выходе получим синусоидальный сигнал с амплитудой в  $\theta(N')$  раз меньше исходной. При этом для пространства изображений

$$\theta(N') = T(N')V(N'), \quad (4)$$

где  $T(N')$  – ФПМ оптической системы,  $V(N')$  – геометрическая ФПМ ТК. Для  $V(N')$  справедлива формула

$$V(N') = \sin(\pi m)/\pi m, m = \delta/\Delta\rho' = \delta N'. \quad (5)$$

Геометрическая ФПМ телекамеры  $V(N')$  при принятых нами условиях, при которых размер пикселя в 15 раз меньше размера минимального элемента структуры  $\Delta\rho'$ , принимает значение 0,993 для предельной пространственной частоты.

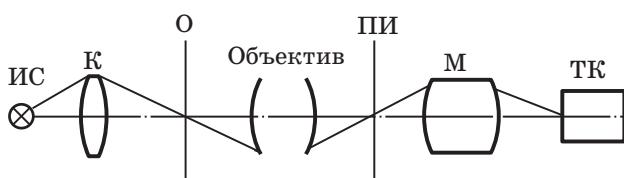
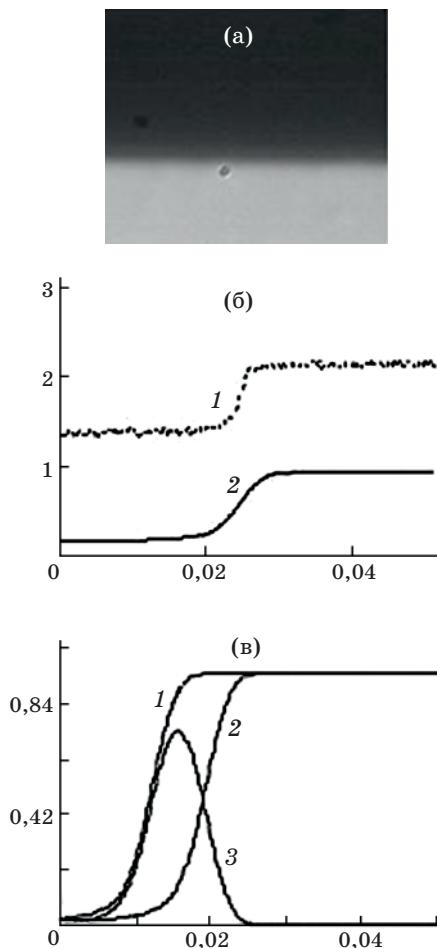


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема измерительной установки. ИС – источник света, К – конденсор, О – тест-объект, ПИ – плоскость изображения тест-объекта, М – вспомогательный микроскоп, ТК – телекамера.

Следует обратить внимание, что неэффективность переносов носителей зарядов и диффузия носителей в подложке приводят к тому, что “суммарная” передаточная функция на предельной пространственной частоте имеет значение примерно в три раза меньшее, чем 0,993 [12].

На рис. 2 приведены фрагмент ТВ изображения края полуплоскости (а), две пограничные кривые, полученные фотометрированием ТВ изображения (б), и две сглаженные пограничные кривые 1 и 2, сдвинутые относительно друг друга на ширину шпалы (в), а также кривая 3, определяемая разностью указанных кривых 1 и 2 и дающая изображение шпалы.



**Рис. 2.** а – фрагмент ТВ изображения края полуплоскости; б – пограничные кривые, полученные фотометрированием ТВ изображения. 1 – результат прямого фотометрирования, 2 – результат сглаживания шумового компонента кривой 1, в – две сглаженные пограничные кривые 1 и 2, сдвинутые относительно друг друга на ширину шпалы; 3 разность кривых 1 и 2 (изображение шпалы шириной, равной сдвигу пограничных кривых).

Для определения минимального сдвига кривых 1 и 2 (рис. 2в) по суммарному светораспределению в изображениях двух сдвинутых ФРЛ сначала была взята производная от функции  $y(x)$ , определяющая ход пограничной кривой, что дает функцию рассеяния линии  $h(x)$  (рис. 3а, кривая 1)

$$h(x) = dy(x)/dx. \quad (6)$$

Для вычисления суммарного светораспределения  $f(x)$  в изображениях двух сдвинутых ФРЛ используем формулу

$$f(x) = h(x + \Delta) + h(x - \Delta) + 2\sqrt{h(x + \Delta)h(x - \Delta)}\mu, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – величина сдвига ФРЛ от нулевого положения,  $\mu$  – степень когерентности освещения объекта, которая определяется модулем нормированного спектра Фурье распределения интенсивности в зрачке испытуемой системы.

Для круглой равномерно освещенной апертуры значение  $\mu$  определяется по формуле

$$\mu = |2(J_1(\pi 2\Delta C))/(\pi 2\Delta C)|, \quad (8)$$

где  $C = A_0/A$  – множитель некогерентности Д.С. Рождественского,  $A_0$  – апертура конденсора  $K$  (рис. 1), которая выбирается равной передней апертуре испытуемой системы  $A$ ,  $J_1(\pi 2\Delta C)$  – функция 1-го рода 1-го порядка.

При настройке измерительной установки апертура освещающих пучков  $A_0$  и апертура испытуемой системы в пространстве объекта  $A$  выбирались одинаковыми. Это приводит к тому, что величина  $\mu$  для минимального сдвига пограничных кривых будет принимать нулевое значение или близкое к нему, что позволяет третьим слагаемым в формуле (7) пренебречь и ограничиться при вычислении  $f(x)$  сложением реально полученных ТВ способом сигналов, определяющих интенсивность (рис. 3а, кривая 2). Задаваясь провалом в центре светораспределения  $f(x)$  и руководствуясь, например, критерием Классена (провал 5%), находим минимальное значение  $\Delta$ , которое в свою очередь определяет сдвиг двух пограничных кривых по рис. 2б. Удвоенный минимальный сдвиг кривых определит разрешающую способность, или предельную пространственную частоту  $N' = 1/b$ , где  $b = 2\Delta$  – шаг миры, отнесенный к пространству изображений.

Далее весь частотный интервал делится на несколько интервалов, для которых можно вычислить, используя операцию свертки, светораспределение в изображении шпалы  $g(x)$ ,

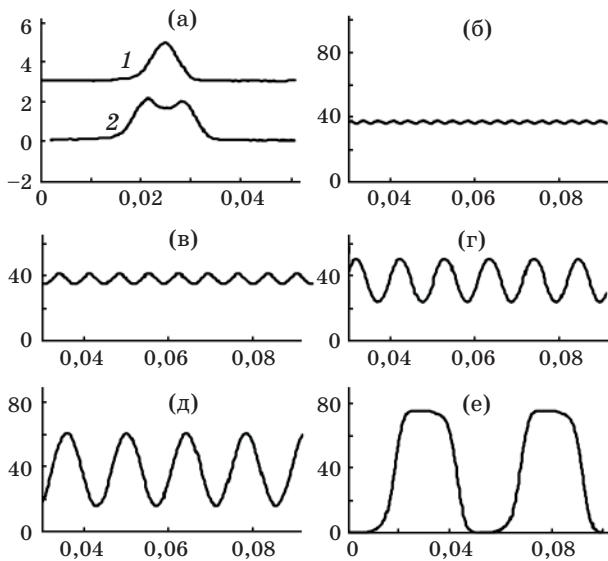


Рис. 3. а – ФРЛ (1) и сумма двух сдвинутых ФРЛ (2); б, в, г, д, е – изображения шпальных мир Фуко с различным шагом (пояснения в тексте).

имеющей шаг в соответствии с пространственной частотой этого интервала, а именно –  $1/b$ ,  $1/2b$ ,  $1/3b$  и т. д., до нулевой частоты (не менее 10 точек) –

$$g(x) \approx g_0(x) \otimes h(x), \quad (9)$$

где  $g_0(x)$  – светораспределение в идеальном изображении миры Фуко,  $\otimes$  – оператор свертки. Для  $g_0(x)$  справедливо уравнение

$$g_0(x) = \sum_{-N}^N \text{rect}\left(\frac{x}{X_0} - nX\right), \quad (10)$$

где

$$\text{rect}\left(\frac{x}{X_0}\right) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{X}{2}, \\ 0 & \text{в остальных точках.} \end{cases} \quad (11)$$

Отметим, что вместо миры Фуко может быть использована и миры с синусоидальным светораспределением, а также и другие виды миры.

В результате получается серия светораспределений (рис. 3б–3е), позволяющих вычислить контраст  $K$  этих изображений по известной формуле

$$K = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \quad (12)$$

и построить график передаточной функции.

Приведенное на рис. 2а изображение и кривые на рис. 3 были получены при оценке качества изображения объектива, имеющего увеличение  $\beta_{\text{и}} = -4\times$  и переднюю апертуру  $A = 0,3$ . На рис. 4

приведены его оптическая схема (а), а также расчетные результаты и наложенные на них результаты измерений (б, в, г). Кривые практически идентичны – среднеквадратическое отклонение кривых, полученных по результатам измерений и их обработки, от теоретических кривых не превышает 4%.

Использование пограничной кривой при оценке качества изображения по сравнению с использованием дифракционных изображений точки или линии с энергетической точки зрения более выгодно. Энергетическое преимущество позволяет в телеканале иметь более высокое отношение сигнал/шум и, следовательно, обеспечивает более высокие метрологические характеристики [8]. Кроме того “точка” и “линия” на тест-объекте должны иметь такой размер, чтобы дифрагирующие на них пучки полностью заполняли апертуру испытуемой системы [9]. Такой

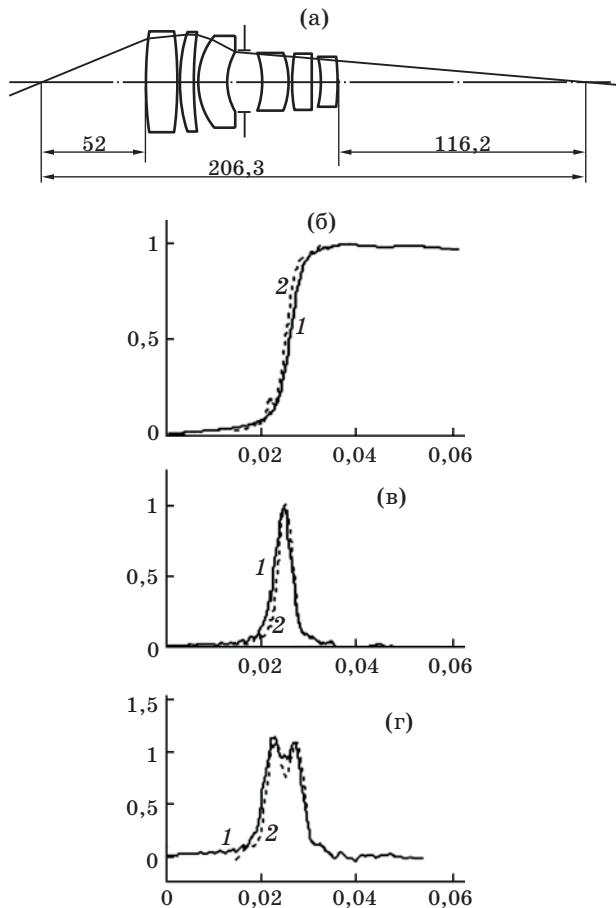


Рис. 4. а – оптическая схема контролируемого объектива, б – расчетная (1) и измеренная (2) пограничные кривые; в – расчетная (1) и измеренная (2) ФРЛ; г – расчетная и измеренная сумма двух сдвинутых ФРЛ.

проблемы нет при использовании тест-объекта в виде полуплоскости.

При экспериментальной проверке описанной методики использовались микрообъективы и объективы видеокамер систем технического зрения, работающих с конечного расстояния на конечное. По этой же методике также проводилась оценка качества изображений в микровизорах проходящего и отраженного света. Опыт показал целесообразность получения передаточной функции не из анализа изображения шпальных миры (рис. 3), а из фурье-преобразования ФРЛ. Обработка результатов измерений проводилась средствами "Mathcad". На рис. 5 представлены результаты вычисления ФПМ  $T(N')$  с учетом влияния ФПМ ТК по формуле (4) для объектива по рис. 4а при использовании преобразования Фурье (а) и использовании методики М.М. Русинова для случаев свертки ФРЛ с тест-объектом в виде синусоидальной миры (б) и миры Фуко (в). Перед выполнением операции свертки ФРЛ нормируется так, чтобы площадь под ее кривой равнялась единице. Контраст в изображении миры Фуко несколько выше, но в целом наблюдается довольно хорошее совпадение результатов.

На рис. 5г приведены для микрообъектива ОПХ-10 ЛБ-0 ( $10 \times 0,25$ , длина тубуса бесконечность) расчетная ФРЛ (кривая 1) и полученная из пограничной кривой через ее производную (кривая 2), среднеквадратическое отклонение кривых друг от друга 8%. На рис. 5д приведена ФПМ, полученная через преобразование Фурье ФРЛ (кривая 2 на рис. 5г).

Отметим, что, используя одномерное преобразование Фурье, мы здесь рассматриваем "плоский" вариант ФПМ, не претендующий на исчерпывающую оценку свойств испытуемой системы, но достаточную для производственной практики. Также построены методика и программное обеспечение "IMATEST" ([www.imatest.com](http://www.imatest.com)), используемые при контроле качества изображения с видеокамер и цифровых фотоаппаратов.

## Выводы

– Модифицированный метод Русинова М.М. оценки качества изображения по пограничной кривой обеспечивает достаточную для производственной практики точность, исключает субъективизм при оценке качества изображения

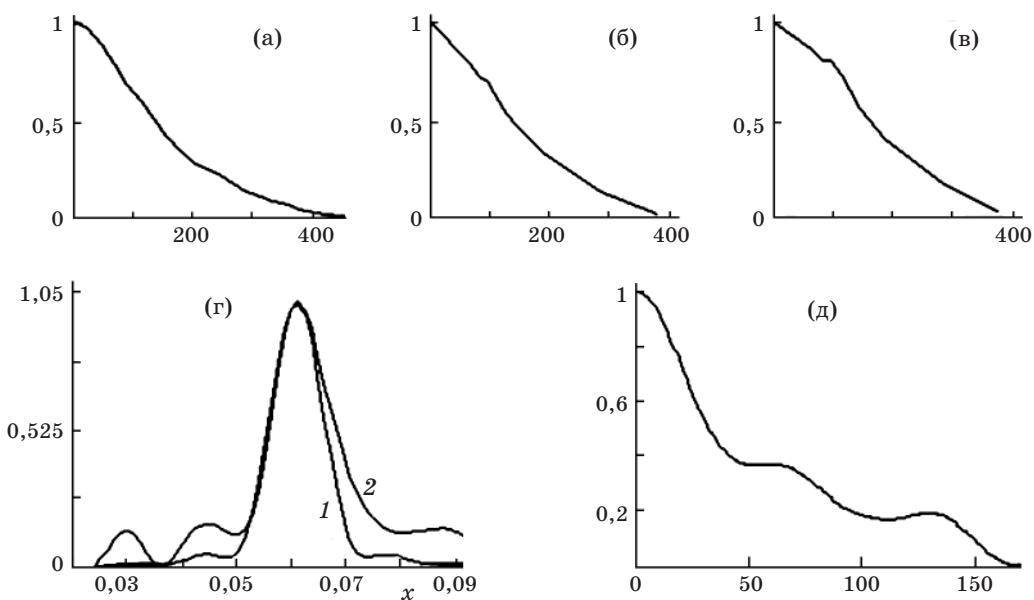


Рис. 5. а – ФПМ, вычисленная для объектива по рис. 4а при использовании преобразования Фурье; б, в – ФПМ, полученные при использовании методики М.М. Русинова для случаев свертки ФРЛ с тест-объектом в виде синусоидальной миры (б) и миры Фуко (в); г – ФРЛ микрообъектива ОПХ-10 ЛБ-0 ( $10 \times 0,25$ , длина тубуса бесконечность) расчетная (1) и полученная из пограничной кривой через ее производную (2); д – ФПМ микрообъектива ОПХ-10 ЛБ-0 ( $10 \times 0,25$ ), полученная через преобразование Фурье ФРЛ.

в микроскопе, прост в реализации в цеховых условиях и наиболее полезен при контроле готового изделия;

– исследования могут проводиться как в белом свете, так и при монохроматическом освещении, что позволяет оценить степень коррекции хроматических aberrаций;

– метод не исключает визуальные методы оценки качества изображения по изображению точки или линии, которые по своей оперативности при цеховой сборке узлов микроскопа на сегодня незаменимы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Папаян Г.В., Агроскин Л.С., Ларина Р.М.* Оценка качества объективов микроскопов на основе телевизионно-компьютерного анализа картин Эри // ОМП. 1995. № 6. С. 21–26.
2. *Зверев В.А., Болдырев Н.И., Сокольский М.Н.* Фотоэлектрический фотометр для измерения концентрации энергии в пятне рассеяния // ОМП. 1977. № 5. С. 27–29.
3. *Зверев В.А., Кирилловский В.К., Сокольский М.Н.* Исследование качества изображения оптических систем методом изофотометрической фоторегистрации // ОМП. 1976. № 8. С. 14–17.
4. *Кирилловский В.К.* Применение телевидения при контроле и аттестации оптических систем. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1983. 56 с.
5. *Кирилловский В.К., Крынин Л.И.* Оценка качества изображения по функции рассеяния линии // ОМП. 1980. № 6. С. 1–4.
6. *Русинов М.М.* Техническая оптика. Л.: Машгиз, 1961. 328 с.
7. *Захарнев А.П., Иванов П.П., Муравьев Г.И., Полевиков М.П., Чухнин А.Я.* Установка для измерения передаточных функций оптико-электронных приборов с цифровой обработкой данных // ОМП. 1978. № 5. С. 25–27.
8. *Великотный М.А., Петрас С.В.* Принципиальные аспекты измерения оптической передаточной функции с помощью дискретного самосканирующего фотоприемника // Оптический журнал. 1994. № 9. С. 50–55.
9. *Герловин Е.Я.* Методика измерения ширины щелевых тест-объектов для контроля микрооптики // ОМП. 1979. № 7. С. 41–43.
10. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
11. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 543 с.
12. *Грязин Г.Н.* К расчету частотных характеристик приборов с зарядовой связью // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 3. С. 22–24.