

ВЫБОР ЛИНЕЙНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ АДАПТЕРА ТЕЛЕКАНАЛА МИКРОСКОПА

© 2005 г. М. А. Волкова; С. Н. Натаровский; Н. Б. Скобелева

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Показано влияние линейного увеличения адаптера телевизионного канала микроскопа на проявление ложных структур – муара и дискретности изображения. Приведены примеры телевизионных изображений при наличии и отсутствии ложных структур, даны рекомендации по выбору увеличения адаптера (с учетом возможности влияния электронным способом на размер телевизионного раstra) и предварительной фильтрации изображения.

Коды OCIS: 180.5810, 220.0180.

Поступила в редакцию 31.05.2005.

Современные микроскопы обычно кроме визуального канала содержат канал для телевизионной камеры или канал для цифрового фотоаппарата, приемником в котором также является матрица ПЗС. Для согласования действия визуального канала с телевизионным и каналом цифрового фотоаппарата вводится дополнительная оптическая система, которую принято называть адаптером (рис. 1). Адаптер является аналогом фотоокуляров, применяющихся в каналах микроскопов, в которых используется пленочная фотокамера или производится регистрация на фотопластинку. Формат фотокадра и фотопластинки больше окулярного поля зрения визуального канала, поэтому увеличение фотоокуляров всегда было больше единицы (до 15–20 крат). Формат матриц ПЗС обычно меньше окулярного поля визуального канала, что приводит к линейному увеличению адаптера (β_a), меньшему единицы. При выборе увеличения адаптера обычно принято принимать во внимание необходимость обеспечения одинаковости линейного поля зрения в пространстве объектов для визуального и телевизионного каналов:

$$\beta_a = D/D_n, \quad (1)$$

где D – диагональ матрицы ПЗС, D_n – диаметр полевой диафрагмы окуляра.

Величины D и D_n принимают несколько значений, отчего, если следовать указанным требованиям, появляется необходимость иметь достаточно широкую номенклатуру адаптеров с разными значениями β_a . Например, для матрицы ПЗС широко используются форматы 1/4", 1/3", 1/2", 2/3", 1" и т. д., которым соответствуют значения D – 4, 5,3, 8, 11, 16 мм и т. д. Аналогично для D_n значение величины изменяется от 8 до 23,3 мм [1]. Если будем иметь пять значений D и пять значений D_n , то потребуется 25 вариантов адаптеров, что наталкивает на мысль о создании панкратических адаптеров или использовать для этих целей оптовар, изменив его увеличение в сторону уменьшения. Последнее не снимает ряд вопросов о выборе значений β_a на краях интервала изменений β_a .

Оценим порядок значений β_a . Задавшись для сужения задачи $D = 8$ мм и $D_n = 12, 15, 18$, и 20 мм, находим из формулы (1) значения $\beta_a = 0,67, 0,53, 0,44$ и 0,40.

При выборе адаптера для использования в телеканале микроскопа необходимо учитывать в первую очередь факторы, определяющие качество телевизионного изображения по разрешающей способности и по отсутствию в нем ложных структур – артефактов. К последним можно отнести явление муара, дискретность изображения и другие искажения

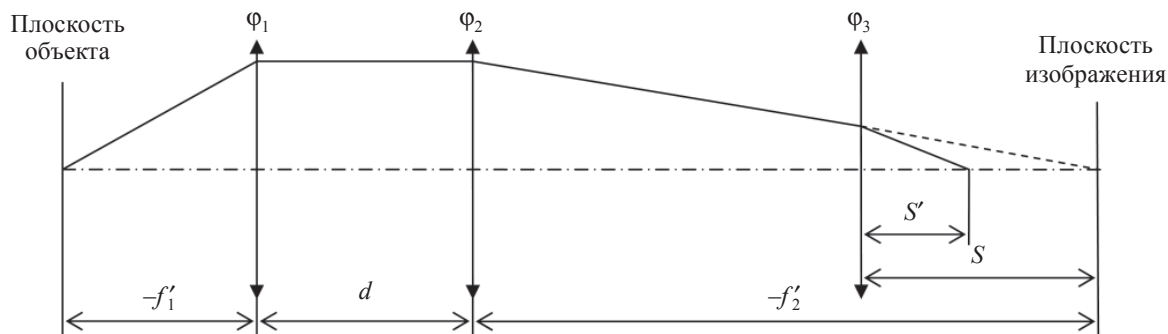
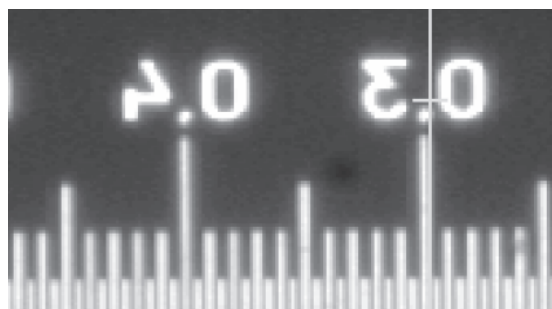


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема микроскопа. f'_1, f'_2 – фокусные расстояния микрообъектива ϕ_1 и тубусной линзы ϕ_2 ; S, S' – передний и задний отрезки адаптера ϕ_3 , d – расстояние между микрообъективом и тубусной линзой.

1 и 2-го рода [2]. Исследования указанных искажений были проведены с помощью микроскопа проходящего света, в состав которого входил светодиодный осветитель ОИ-32СД производства ООО “Промсервис”, конденсор КОН-3, микрообъектив 4,7×0,11 с длиной тубуса 190 мм и телекамера VNC-743 с модернизированным программным обеспечением OSC16 фирмы ЭВС. При исследованиях использовался адаптер АОТ-1С, имеющий увеличение 0,3, 0,5 и 1 крат. Тем не менее, все телевизионные изображения, приведенные в работе, были получены на прямом тубусе без использования адаптера. В качестве тест-объекта использовался объект-микрометр ОМ-О с ценой деления 0,005 мм.

На рис. 2, 3 приведены изображения тест-объекта для случаев правильного выбора значения β_a (а) и неудачного выбора (б). Для демонстрации действия искажений 1 и 2-го рода был использован прием, заключающийся в изменении размера телевизионного растра, что эквивалентно при использовании одной и той же матрицы изменению ее шага. Рисунок 2 показывает влияние муара (искажение 1-го рода) на изображение, там же для более ясного понимания явления помимо изображения самого тест-объекта приведена осциллограмма светораспределения в его изображении. Сравнение осциллограмм а, б и в четко показывает влияние ложной структуры муара, который проявляется на светораспределении в виде биений, под которыми принято понимать результат сложения двух гармонических колебаний, периоды которых и начальные фазы отличаются ненамного друг от друга [3]. Изображения а, б и в отличаются друг от друга размером телевизионного растра – для а размер растра 768×576, для б – 752×240 и для в – 320×240. На осциллограмме рис. 2а биение отсутствует и нет муара, а на рис. 2б и 2в имеются биения и муар. Амплитуда биения для изображения на рис. 2в выше, чем на рис. 2б. На более сложных, чем объект-микрометр, объектах влияние муара будет не столь очевидным и отделить артефакт от истины будет сложно, если не невозможно. На рис. 3а, 3б показано влияние искажений 2-го рода, проявляющих-

(а)



(б)

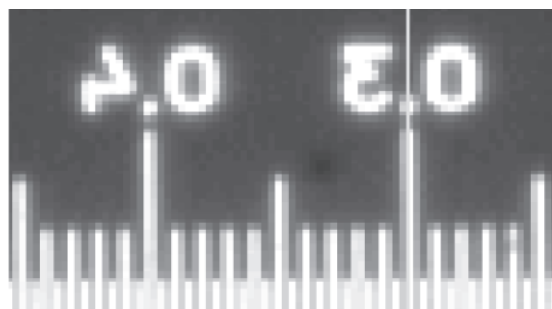
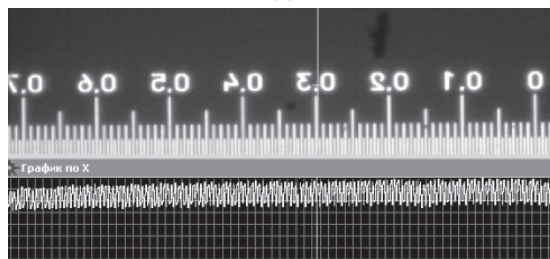
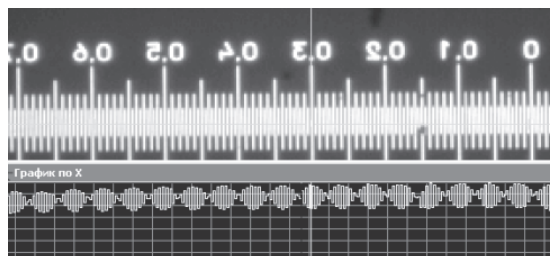


Рис. 3. Проявление искажений 2-го рода. а – изображение тест-объекта и его осциллограмма при размере ТВР 768×576, б – изображение тест-объекта и его осциллограмма при размере ТВР 768×240.

(а)



(б)



(в)

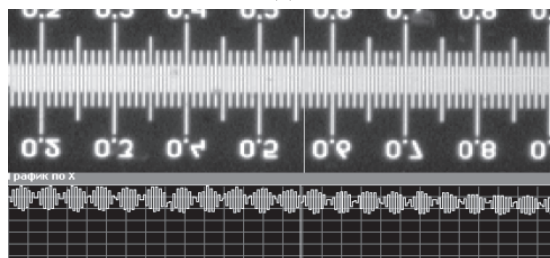


Рис. 2. Проявление искажений 1-го рода. а – изображение тест-объекта и его осциллограмма при размере телевизионного растра (ТВР) 768×576, б – изображение тест-объекта и его осциллограмма при размере ТВР 768×240, в – изображение тест-объекта и его осциллограмма при размере ТВР 320×240.

ся в виде дискретности изображения. Формат телевизионного растра для рис. 3а 768×576, а для рис. 3б 752×240. Об этих искажениях здесь подробно говорить не будем.

Так как на матрице изображение подвергается дискретизации, то его спектр Фурье будет периодическим повторением спектра объекта $G_0(f)$ в узлах некоторой сетки, определяемой геометрией матрицы, – сеткой, в узлах которой находятся ее чувстви-

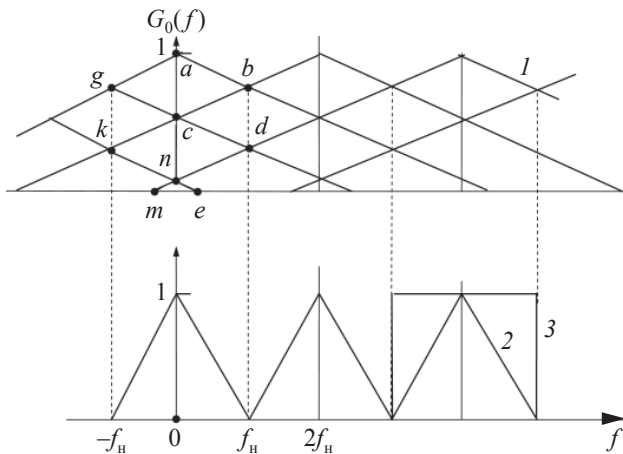


Рис.4. 1, 2 – $G_0(f)$ -спектры изображения объекта, f – пространственная частота, f_H – частота Найквиста, 3 – передаточная функция ФНЧ, кривые a, b, c, d, n, e и a, g, k, n, m характеризуют явление мимикрии частот.

тельные элементы. Последняя описывается двухмерной гребенчатой функцией – так называемой выборочной функцией [4]. Если мультиплицируемые спектры объекта будут перекладываться, то возникает явление, названное в [5] мимикрией частот. Точка пересечения двух соседних мультиплицированных спектров объекта определяет частоту наложения – частоту Найквиста, которая равна половине шага мультиплицированного спектра (рис. 4).

Отсюда следует первое условие отсутствия артефактов в телевизионном изображении – область существования спектра объекта должна быть ограничена частотой Найквиста. Это условие можно выразить простой формулой

$$\lambda/2A' \geq 2\Delta x, \quad (2)$$

где λ – длина волны, A' – числовая апертура в пространстве изображения оптической системы, Δx – шаг матрицы ПЗС. Левая часть (2) определяет разрешающую способность оптической системы в случае объекта в виде решетки.

Второе условие отсутствия артефактов в изображении заключается в том, чтобы последующая после телекамеры система, выступающая как фильтр нижних частот (ФНЧ), устраняла дискретность изображения (рис. 3). Отметим, что этой системой может быть глаз оператора, наблюдающего на экране мо-

нитора (дисплея) изображение. Во всяком случае в соответствии с теоремой выборки (или иначе теоремой Котельникова) эта система, выступающая как ФНЧ, должна иметь спектр, область существования которого также определяется частотой Найквиста.

Для решения вопроса настоящей работы – выбора значения β_a – достаточно первого условия (2). Для полноты следует указать, что помимо условия (2) иногда используют другое, следующее из возможности максимальной реализации потенциальной точности определения координат точек объекта. В статье [6] рекомендуется при этом иметь радиус ρ' импульсной характеристики объекта несколько меньшим размера пиксела Δx . Математически это можно выразить для дифракционно-ограниченной системы таким образом:

$$\rho' = 1,22\lambda/2A' \geq \Delta x. \quad (3)$$

В левой части (2) стоит отношение, следующее из критерия разрешения по Релею, относящегося к точечным объектам. Оценим значения A' из условий (1) и (2), задав ряд значений Δx и приняв $\lambda = 546$ нм, результаты сведем в табл. 1. Здесь A'_1, A'_2 – значения апертуры A' , вычисленные по формулам (2) и (3) соответственно. Разница в результатах очевидна, для второго случая критерий Найквиста не выполняется.

Сравним полученные значения апертур с размерами задних апертур микрообъективов, приведенными в табл. 2, где указаны значения $\beta_{об}$ – линейного увеличения объективов, а также ρ'_1 и ρ'_2 , вычисленные соответственно по формулам (2) и (3). Для согласования значений $A'_{об}$ и ρ' со значениями A' и Δx применим формулу

$$\beta_{а\text{ опт}} = A'_{об}/A', \quad (4)$$

где $\beta_{а\text{ опт}}$ – оптимальное значение β_a . Вычисления проведены при $\Delta x = 7$ мкм и $A'_1 = 0,19$, $A'_2 = 0,048$.

Таблица 1. Расчетные значения апертуры A'

Δx , мкм	$A'_1, *$	$A'_2, **$
10	0,014	0,033
7	0,019	0,048
5	0,027	0,067
3	0,046	0,111

* Расчет по формуле (1).

** Расчет по формуле (2).

Таблица 2. Расчетные значения параметров микрообъективов

$\beta_{об}$	$A_{об}$	$A'_{об}$	ρ'_1	$\rho''_1 = \rho'_1 \beta_a$	ρ'_2	$\rho''_2 = \rho'_2 \beta_a$	β_{a01}	β_{a02}
5	0,1	0,02	6,825	4,6–2,7	16,653	11,2–6,7	1,03	0,42
10	0,3	0,03	4,55	3,1–1,8	11,102	7,4–4,4	1,54	0,63
20	0,4	0,02	6,825	4,6–2,7	16,653	11,2–6,7	1,03	0,42
40	0,65	0,016	8,374	5,6–3,4	20,433	13,7–8,2	0,84	0,34
100	0,9	0,009	15,167	10,2–6,1	37,007	24,8–14,8	0,46	0,19

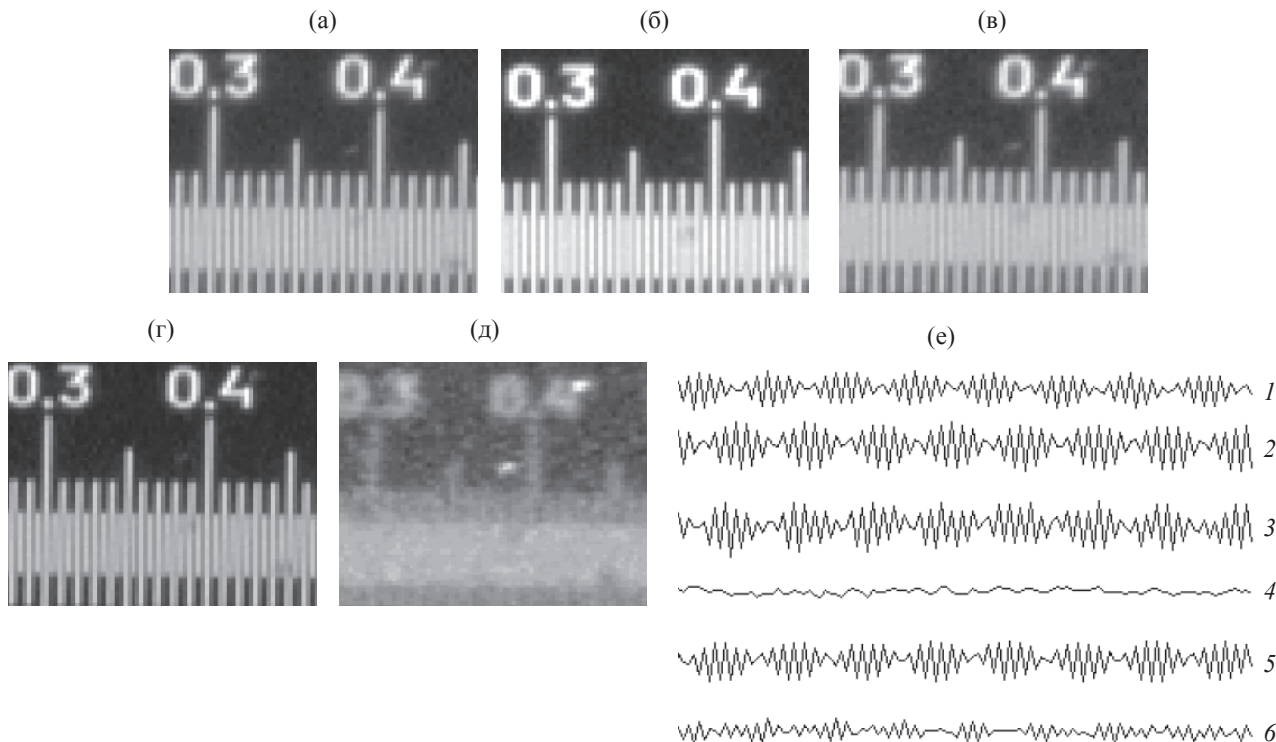


Рис. 5. а, б – изображения тест-объекта в белом свете при размерах ТВР 752×240 и 320×240; в–д – изображения тест-объекта в монохроматическом свете – $\lambda = 435$ (в), 532 (г) и 697 нм (д) при размере ТВР 752×240; е – осциллограммы светораспределения в изображениях тест-объекта – кривые 1, 2 – случаи а, б; кривые 4–6 случаи в–д; кривая 3 – сумма кривых 4–6.

Указанные в таблице β_{a01} , β_{a02} – значения $\beta_{a\text{опт}}$, найденные по формуле (4) для двух рассматриваемых случаев, ρ_1'' и ρ_2'' вычислены для интервала значений $\beta_a = 0,67-0,4$, определяемого по формуле (4) для интервала значений $D = 12-20$.

Из табл. 2 видим, что в большинстве случаев значения ρ_1'' и ρ_2'' не соответствуют условию $\rho'' = 2\Delta x$, откуда следует, что подход к определению значения β_a из условия одинаковости наблюдаемых полей в визуальном и телевизионном каналах не обеспечивает в большинстве случаев условий отсутствия ложных структур в телевизионном изображении. В то же время видим, что значение β_{a01} только для $\beta_{o6} = 100^\times$ попадает в интервал значений β_a , а β_{a02} для $\beta_{o6} = 5^\times, 10^\times$ и $20^\times$. Отметим, что значение β_{a01} мало отличается от единицы, кроме случая работы с объективом $100^\times$.

Если, тем не менее, желательно сохранить одинаковость полей в визуальном и телевизионном каналах, то для выполнения критерия Найквиста до дискретизации следует делать предварительную фильтрацию изображения [7], например уменьшая апертурную диафрагму конденсора осветительной части микроскопа, так как в соответствии с формулой Д.С. Рождественского [8]

$$\rho = \lambda / (A + A_k), \quad (5)$$

$$\rho' = \rho \beta_{o6},$$

где A_k – апертура конденсора осветительной части микроскопа.

Условия (2), (3) и (5) показывают зависимость проявления муара от длины волны. Для выявления указанной зависимости были получены телевизионные изображения тест-объекта в монохроматическом свете с использованием интерференционных фильтров с максимумами пропускания при 435, 540 и 715 нм. На рис. 5 приведены пять сюжетов, соответствующих двум “белым” изображениям разных форматов а, б и трем монохроматическим изображениям в, г, д. Там же показаны осциллограммы 1–6, соответствующие указанным изображениям. Из рисунка ясно, что цветное изображение для $\lambda = 715$ нм практически не разрешается и его осциллограмма не показывает наличия биения – муар отсутствует, а для двух других монохроматических изображений наблюдаются биения и особенно четко они выражены для основной длины волны 540 нм. Кривая 3 является простой суммой кривых 4–6, соответствующих монохроматическим изображениям. Кривые 1 и 2 соответствуют форматам телевизионного раstra 752×240 и 320×240, и из хода кривых видно, что амплитуды биения разные, кроме того, имеет место фазовый сдвиг.

Из сказанного следует вывод, что, помимо предварительной фильтрации до дискретизации изображения, эффективен путь решения задачи, связанный с использованием возможности электронным способом изменять число элементов разложения в матрице, т. е. влиять не на значение ρ' , определяющего

разрешающую способность оптической системы, а на шаг матрицы Δx .

Таким образом, для случая поиска интересующего сюжета на объекте увеличение адаптера может определяться из (4), а для случая работы и исследования найденного сюжета на объекте следует использовать адаптер с увеличением, определяемым из (3), что вместе с возможностью влияния на размер телевизионного раstra может обеспечить факсимильность телевизионного изображения в микроскопе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панов В.А., Андреев Л.И.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 430 с.
2. *Игнатьев Н.К.* Дискретизация и ее приложения. М.: Связь, 1980. 263 с.
3. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. 551 с.
4. *Гудмен Д.Ж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
5. *Хемминг Р.В.* Численные методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
6. *Хромов Л.И., Цыцулин А.К., Куликов А.Н.* Видеоинформатика передачи и компьютерная обработка информации. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
7. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 790 с.
8. *Рождественский Д.С.* Избранные труды. М.–Л.: Наука, 1964. 430 с.