

К. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, г. Киев, «Информационные программные системы»
E-mail: Volodymyr_Borovytsky@iss.org.ua

Дата поступления в редакцию
10.09 2003 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬЕВ
(ОНИИТТ, г. Одесса)

ВЫБОР ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Показано, что линейное увеличение и пространственная разрешающая способность микроскопа определяют тип и параметры устанавливаемой цифровой камеры.

Быстрый прогресс в области производства цифровых камер, которые в настоящее время имеют более миллиона фоточувствительных элементов, существенно расширяет возможности оптической микроскопии [1]. Так, установка цифровой камеры (ЦК) на оптическом микроскопе позволяет фиксировать увеличенное изображение объектов, сохранять их в виде файлов, выводить на печать и передавать по локальным и глобальным компьютерным сетям [2].

Важнейшим требованием к оптическому микроскопу является высокая пространственная разрешающая способность. Поэтому задача выбора ЦК, которая не снижает пространственную разрешающую способность микроскопа, является актуальной для широкого круга специалистов, работающих с микрообъектами в промышленности, медицине, научных организациях.

Пространственная разрешающая способность (ПРС) характеризует способность оптического или оптико-электронного прибора формировать контрастные изображения объектов с малыми линейными или угловыми размерами [3, с. 201; 4, с. 41]. К распространенным численным оценкам ПРС относятся минимальный период или максимальная пространственная частота гармонической составляющей сигнала в плоскости предметов, которая проходит через оптическую систему — фильтр низких пространственных частот [5, с. 235; 6, с. 32]. Другими словами, это минимальный период дифракционной решетки, установленной в плоскости предметов, штрихи которой могут быть различимы в плоскости изображения [3, с. 209]. Очевидно, что этот минимальный период является величиной, обратно пропорциональной максимальной пространственной частоте сигнала.

Минимальный период может быть рассчитан по следующей формуле [7, с. 156]:

$$p_o = \frac{\lambda}{2 \cdot NA} = \frac{1}{f_o}, \quad (1)$$

где p_o, f_o — соответственно минимальный период и максимальная частота гармонической составляющей пространственного сигнала в плоскости предметов, прошедшей через оптическую систему микроскопа;

λ — длина волны оптического излучения;
 NA — цифровая апертура микрообъектива микроскопа.

Так как многоэлементный фотоприемник ЦК располагается в плоскости изображения оптической системы микроскопа, то следует рассчитать значение минимального периода (1) в плоскости изображения. Для этого необходимо умножить величину минимального периода (1) на линейное увеличение оптической системы микроскопа [8, с. 56].

При этом следует учесть, что линейное увеличение микроскопа имеет две составляющие. Первая составляющая — линейное увеличение системы «микрообъектив — тубусная линза» для микроскопов с бесконечной длиной тубуса или линейное увеличение микрообъектива для микроскопов с конечной длиной тубуса 160, 170, 190, 250 мм [9, с. 150]. Это увеличение указано на микрообъективах микроскопа. Вторая составляющая — линейное увеличение оптического элемента для установки ЦК, аналоговой телевизионной камеры или пленочного фотоаппарата на микроскоп [8, с. 56]. В литературе такой узел называют фототубусом, микрофотонасадкой, гомалом, адаптером камеры или фотоаппарата, телевизионным адаптером и т. п. [4, с. 244; 8, с. 102]. Основным назначением такого элемента является согласование поля зрения оптической системы микроскопа и ЦК [8, с. 56].

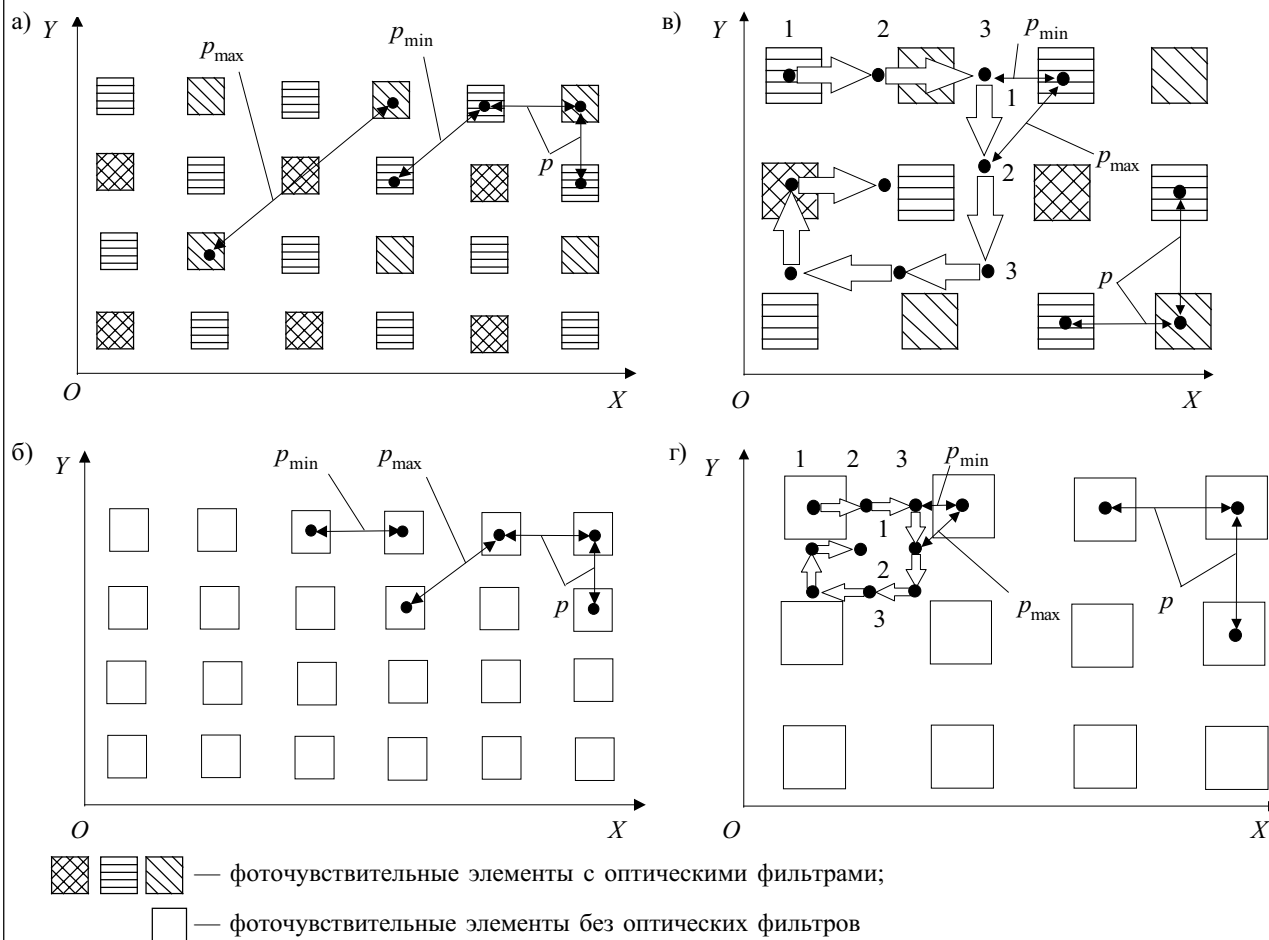
Наиболее распространенные значения линейного увеличения фототубуса — 0,63, 1,0, 2,5, 3,2, 4,0, 6,3. В современных микроскопах также используются фототубусы с переменным увеличением в пределах 0,5 — 1,5.

Таким образом, минимальный период (p_o') и максимальная частота (f_o') гармонической составляющей пространственного сигнала в плоскости изображения, прошедшей через оптическую систему микроскопа, будут рассчитываться по следующей формуле:

$$p_o' = \beta \beta_T p_o = \beta \beta_T \frac{\lambda}{2 \cdot NA} = \beta \beta_T \frac{1}{f_o} = \frac{1}{f_o'}, \quad (2)$$

где β, β_T — линейное увеличение системы «микрообъектив — тубусная линза» или микрообъектива и фототубуса, соответственно.

Многоэлементный фотоприемник ЦК представляет собой двухмерную периодическую структуру фоточувствительных элементов (ФЧЭ) [10, 11]. В цветных ЦК, которые наиболее распространены в микроскопии, формирование цветных составляющих изображения может происходить следующими способами (см. рисунок).



Пространственная разрешающая способность цифровых камер:

а — цифровая камера с фильтром Байера; б — полноцветная цифровая камера; в — цифровая камера с фильтром Байера и микросканированием (светлыми стрелками показано перемещение многоэлементного фотоприемника при формировании сигнала); г — полноцветная цифровая камера с микросканированием

Тип 1. Цифровая камера с фильтром Байера. ФЧЭ неподвижного многоэлементного фотоприемника ЦК имеют оптические фильтры, каждый из которых пропускает оптическое излучение в определенном диапазоне длин волн [12]. Такая топология позволяет с одного фотоприемника считывать три цветовые составляющие (рис., а; табл. 1) [13, 14]. Наиболее распространенным является использование оптических фильтров RGB (красный — зеленый — синий) или CMY (малиновый — желтый — бирюзовый) [12].

Недостатком такого способа формирования цветного изображения является снижение ПРС, определяемой пространственным периодом между ФЧЭ с одинаковыми оптическими фильтрами. Для обеспечения одинаковой ПРС по осям OX , OY пространственные периоды и размеры ФЧЭ вдоль этих осей выполняются одинаковыми (см. рис.). В этом случае максимальный и минимальный периоды пространственной дискретизации изображения будут равны максимальному и минимальному периодам между ФЧЭ с одинаковыми оптическими фильтрами и могут быть рассчитаны из простых геометрических соотношений (рис., а):

$$\begin{aligned}
 p_{\max} &= k_{\max} p = k_{\max} \frac{x_M}{N_X}; \\
 p_{\min} &= k_{\min} p = k_{\min} \frac{x_M}{N_X},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где k_{\max} , k_{\min} — коэффициенты для расчета максимального и минимального периодов пространственной дискретизации изображения;
 p — расстояние между центрами соседних ФЧЭ — пространственный период ФЧЭ;
 x_M , N_X — размер фотоприемника ЦК вдоль оси OX и количество ФЧЭ вдоль оси OX , соответственно.

В ЦК с фильтрами Байера величина k_{\min} характеризует расстояние между соседними по диагонали ФЧЭ с зелеными или желтыми оптическими фильтрами (рис., а). ФЧЭ с другими оптическими фильтрами имеют пространственный период в два раза больший, поэтому k_{\max} будет равен значению, в два раза большему, чем k_{\min} :

$$k_{\min} = \sqrt{2}; k_{\max} = 2\sqrt{2}.
 \tag{4}$$

Тип 2. Полноцветная цифровая камера. В этих ЦК перед неподвижным фотоприемником устанавливается оптический элемент, осуществляющий переключение диапазона пропускаемых длин волн, — по-

Современные цифровые и аналоговые камеры для микроскопии

Наименование цифровой камеры, фирма-производитель	Тип цифровой камеры	Формат и размеры матрицы ФЧЭ, мм (Размер ФЧЭ, мкм)	Количество ФЧЭ (максимальный размер изображения в пикселах)	Количество цветочных каналов × разрядность канала в битах
AxioVision HR, Zeiss	Тип 3	2/3", 8,7×6,9 мм (6,7×6,7 мкм)	1300×1030 (3600×3090)	3×14
DC 500, Leica-Microsystems	Тип 3	2/3", 8,7×6,9 мм (6,7×6,7 мкм)	1300×1030 (3600×3090)	3×14
DP 70, Olympus	Тип 3	2/3", 8,8×6,6 мм (6,45×6,45 мкм)	1392×1040 (4080×3072)	3×12
DXM 1200F, Nikon	Тип 3	2/3", 8,8×6,6 мм (6,45×6,45 мкм)	1280×1024 (3840×3072)	3×8
Polaroid DMC 2, Polaroid	Тип 1	2/3", 8,8×6,6 мм	1616×1296 (1600×1200)	3×14
Micro Imager 2, QImaging	Тип 1	2/3", 8,8×6,6 мм (6,7×6,7 мкм)	1300×1030 (1280×1024)	3×12
Spot RE, Digital Instruments	Тип 2	11,8×8,9 мм (7,4×7,4 мкм)	1600×1200 (1600×1200)	3×10
KCC-530, СОСОМ Аналоговая телевизионная камера с захватчиком кадров	Тип 1	2/3", 4,8×3,6 мм (6,5×6,5 мкм)	752×582 (752×580)	3×8

ворачивающийся диск с оптическими фильтрами, жидкокристаллический переключаемый фильтр [15]. ФЧЭ не имеют оптических фильтров, и цветное изображение формируется компоновкой трех или более кадров, каждый из которых содержит одну цветовую составляющую (рис., б). К этой группе следует отнести ЦК со светоделителем, тремя оптическими фильтрами и тремя многоэлементными фотоприемниками, каждый из которых формирует одну цветовую составляющую [16]. (В настоящее время использование ЦК с тремя фотоприемниками ограничено из-за их сложности, трудоемкости юстировки и высокой стоимости.)

Главным преимуществом полноцветной ЦК с переключаемым оптическим фильтром является высокая ПРС [15]. Это обусловлено тем, что каждый ФЧЭ формирует все цветовые составляющие. Поэтому значение коэффициента k_{\min} будет равно 1, а коэффициент k_{\max} , характеризующий расстояние между соседними диагональными элементами, будет равен квадратному корню из 2 (рис., б):

$$k_{\min} = 1; k_{\max} = \sqrt{2}. \quad (5)$$

Тип 3. Цифровая камера с фильтром Байера и микросканированием. Для уменьшения пространственного периода дискретизации изображения фотоприемник ЦК, имеющий ФЧЭ с оптическими фильтрами Байера, стали оснащать устройством микросканирования. В этом случае цветное изображение формируется путем совмещения цветных кадров, полученных при малых смещениях фотоприемника в пределах расстояния между ФЧЭ с одинаковыми оптическими фильтрами [17—20]. Тогда ЦК, использующая фотоприемник с количеством ФЧЭ 1300×1030, способна сделать 9 последовательных цифровых снимков и сформировать цветное изображение размером 3600×3090=12051000 пикселей (рис., в).

Преимуществом такого способа формирования цветных изображений является малый пространственный период дискретизации изображения, который может оказаться меньше пространственного периода ФЧЭ. Преимуществом является также отсутствие вносящих искажения оптических элементов между оптической системой и фотоприемником (рис., в). В настоящее время данный способ считается в микроскопии наиболее перспективным, что подтверждается выпуском таких ЦК всеми крупными производителями оборудования для микроскопии — Zeiss, Leica, Olympus, Nikon [17—20].

ПРС цифровой камеры с микросканированием также определяется периодом пространственной дискретизации изображения (т. е. пространственным периодом между положениями ФЧЭ с одинаковыми оптическими фильтрами) в моменты формирования цифровых кадров (рис., в). Поэтому значения коэффициентов k_{\max} , k_{\min} будут равны соответствующим значениям для ЦК с фильтром Байера, деленным на M — количество точек считывания изображений вдоль оси координат при микросканировании (рис., в):

$$k_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{M}; k_{\max} = \frac{2\sqrt{2}}{M}. \quad (6)$$

В современных ЦК величина M составляет 2 и 3; значение $M=1$ соответствует случаю, когда формирование цветного изображения происходит без микросканирования [17—20].

Тип 4. Полноцветная ЦК с микросканированием. Теоретически микросканирование можно объединить с применением оптического элемента для переключения используемого диапазона длин волн. В этом случае каждое цифровое изображение может быть получено компоновкой кадров, полученных для каждого диапазона длин волн и для каждого поло-

жения фотоприемника ЦК (рис., з). Такой способ формирования позволяет достичь максимальной ПРС, но практическая его реализация требует существенного усложнения конструкции ЦК. В настоящее время в микроскопии такие ЦК не используются.

Очевидно, что значения коэффициентов k_{\max} , k_{\min} будут равны соответствующим значениям для полноцветной ЦК, деленным на количество точек считывания изображений вдоль оси координат при микросканировании:

$$k_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{M}; k_{\min} = \frac{1}{M}. \quad (7)$$

Согласно теореме Котельникова, дискретная система, в данном случае микроскоп с ЦК, не будет вносить искажения в пространственный аналоговый сигнал, если выполняется следующее условие: максимальная пространственная частота гармонической составляющей сигнала (2), прошедшая через оптико-электронный тракт, не превышает половины частоты пространственной дискретизации [5, с. 81].

Эта теорема может быть сформулирована следующим образом для случая микроскопа с ЦК: ЦК не будет вносить искажения в пространственный сигнал, если минимальный период гармонической составляющей сигнала в плоскости изображения микроскопа, прошедшей через оптическую систему, (см. (2)) будет в два раза больше максимального периода пространственной дискретизации изображения, создаваемой двухмерной периодической структурой ФЧЭ (см. (3)):

$$f_o' = \frac{1}{p_o'} = \frac{1}{\beta\beta_T \frac{\lambda}{2 \cdot NA}} \leq \frac{1}{2 \cdot p_{\max}} = \frac{1}{2 \cdot k_{\max} p} = \frac{1}{2 \cdot k_{\max} \frac{x_M}{N_X}}; \quad (8)$$

$$p_o' = \beta\beta_T \frac{\lambda}{2 \cdot NA} \geq 2 \cdot p_{\max} = 2 \cdot k_{\max} p = 2 \cdot k_{\max} \frac{x_M}{N_X}. \quad (9)$$

Для того чтобы численно характеризовать выполнение условия (4), введем коэффициент использования ПРС микроскопа при установке ЦК. Такой коэффициент, обозначаемый далее η , будет равен отношению минимального периода гармонической составляющей сигнала в плоскости изображения микроскопа (2) к половине максимального периода пространственной дискретизации изображения в ЦК (3):

$$\eta = \frac{p_o'}{2 \cdot p_{\max}} = \frac{\beta\beta_T \frac{\lambda}{2 \cdot NA}}{2 \cdot k_{\max} p} = \frac{\beta\beta_T \frac{\lambda}{NA}}{k_{\max} \frac{x_M}{N_X}}. \quad (10)$$

Если η больше 1, это означает, что ЦК не снижает ПРС микроскопа. В тех случаях, когда этот коэффициент имеет значение, во много раз большее 1, ЦК

обладает запасом по ПРС намного большим, чем требуется для работы с данным микроскопом. Если коэффициент меньше 1, то условие (4) не выполняется, и ЦК будет вносить искажения в изображение, формируемое оптической системой микроскопа, и тем самым снижать его ПРС.

В визуальной микроскопии есть понятия полезного и пустого (бесполезного) видимого увеличения микроскопа [3, с. 35]. Полезное увеличение отражает правильное согласование ПРС микроскопа и ПРС глаза наблюдателя [3, с. 138]. По существу, предложенный коэффициент η характеризует полезное или пустое (бесполезное) линейное увеличение в цифровой микроскопии. Полезное увеличение обеспечивает согласование оптической системы микроскопа и ЦК по ПРС. Условие этого согласования — коэффициент η приблизительно равен 1. Если η больше 1, это случай пустого (бесполезного) увеличения, когда минимальный размер изображения объекта p_o' больше, чем два максимальных периода пространственной дискретизации изображения в ЦК. В противоположном случае, когда η значительно меньше 1, минимальный размер изображения p_o' меньше двух максимальных периодов пространственной дискретизации изображения, и информация о фрагментах малого размера в этих цифровых изображениях теряется.

Выбор большего линейного увеличения оптической системы мог бы предотвратить потерю информации и сделать видимыми эти фрагменты в цифровых изображениях.

Расчет коэффициентов использования ПРС η для типового микроскопа с микрообъективами различного увеличения и современной ЦК (табл. 2) показывает, что при использовании наиболее распространенных сухих микрообъективов с увеличением 5—50 и фототубуса с линейным увеличением 1,0 только полноцветная ЦК (тип 2) обеспечивает наилучшее согласование ЦК и оптической системы микроскопа по ПРС. В этих условиях использование ЦК с фильтром Байера (тип 1) не позволяет использовать максимальную ПРС микроскопа, а ЦК с фильтром Байера и микросканированием (тип 3) обладает излишним двукратным запасом ПРС.

Установка фототубуса с линейным увеличением 0,63 позволяет увеличить поле зрения ЦК в пространстве предметов микроскопа. Однако это приводит к уменьшению изображения минимального периода p_o' и, соответственно, к уменьшению коэффициента использования ПРС η . Это делает возможным применение только ЦК с микросканированием, а все остальные типы ЦК будут снижать в большей или меньшей мере ПРС микроскопа. Если линейное увеличение фототубуса равно 2,5, что используется только при съемке микрообъектов на пленочных камерах, то ЦК с фильтром Байера хорошо согласуется с микроскопом по ПРС, а ЦК других типов будут иметь излишний запас по ПРС.

Особо следует отметить, что использование современных иммерсионных микрообъективов с увеличением 20—100 и максимальной числовой апертурой 0,8—1,40, которые имеют малые величины p_o' , существенно повышают требования к ПРС ЦК, что подтверждается меньшими значениями η при равных прочих условиях (см. табл. 2). Использование сухих микрообъективов большого увеличения (100—250)

СИГНАЛОПРЕОБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Таблица 2

*Коэффициенты использования ПРС микроскопа
(период ФЧЭ $p=6,7$ мкм, длина волны $\lambda=0,55$ мкм, иммерсионные микрообъективы помечены звездочкой)*

Линейное увеличение β	Цифровая апертура NA	Минимальный период p_0 , мкм	Значение βp_0 , мкм	Значение $p_0' = \beta \beta_T p_0$, мкм	Коэффициенты η , %					
					ЦК—Тип 1		ЦК—Тип 2		ЦК—Тип 3	
					η_{min}	η_{max}	η_{min}	η_{max}	η_{min}	η_{max}
Линейное увеличение фототубуса $\beta_T=1,0$										
20,00	0,40	0,69	13,75	13,75	72,56	36,28	102,61	72,56	217,67	108,84
40,00	0,65	0,42	16,92	16,92	89,30	44,65	126,29	89,30	267,90	133,95
50,00	0,80	0,34	17,19	17,19	90,70	45,35	128,26	90,70	272,09	136,05
63,00	0,85	0,32	20,38	20,38	107,56	53,78	152,11	107,56	322,67	161,33
100,00	0,95	0,29	28,95	28,95	152,75	76,38	216,03	152,75	458,26	229,13
100,00*	1,30	0,21	21,15	21,15	111,63	55,81	157,86	111,63	334,88	167,44
125,00	0,95	0,29	36,18	36,18	190,94	95,47	270,03	190,94	572,82	286,41
150,00	0,95	0,29	43,42	43,42	229,13	114,56	324,04	229,13	687,39	343,69
250,00	0,95	0,29	72,37	72,37	381,88	190,94	540,06	381,88	1145,65	572,82
20,00*	0,80	0,34	6,88	6,88	36,28	18,14	51,31	36,28	108,84	54,42
40,00*	1,30	0,21	8,46	8,46	44,65	22,33	63,15	44,65	133,95	66,98
60,00*	1,40	0,20	11,79	11,79	62,19	31,10	87,95	62,19	186,58	93,29
Линейное увеличение фототубуса $\beta_T=0,63$										
20,00	0,40	0,69	13,75	8,66	45,71	22,86	64,65	45,71	137,13	68,57
40,00	0,65	0,42	16,92	10,66	56,26	28,13	79,56	56,26	168,78	84,39
50,00	0,80	0,34	17,19	10,83	57,14	28,57	80,81	57,14	171,42	85,71
63,00	0,85	0,32	20,38	12,84	67,76	33,88	95,83	67,76	203,28	101,64
100,00	0,95	0,29	28,95	18,24	96,23	48,12	136,10	96,23	288,70	144,35
100,00*	1,30	0,21	21,15	13,33	70,33	35,16	99,45	70,33	210,98	105,49
125,00	0,95	0,29	36,18	22,80	120,29	60,15	170,12	120,29	360,88	180,44
150,00	0,95	0,29	43,42	27,36	144,35	72,18	204,14	144,35	433,05	216,53
250,00	0,95	0,29	72,37	45,59	240,59	120,29	340,24	240,59	721,76	360,88
20,00*	0,80	0,34	6,88	4,33	22,86	11,43	32,32	22,86	68,57	34,28
40,00*	1,30	0,21	8,46	5,33	28,13	14,07	39,78	28,13	84,39	42,20
60,00*	1,40	0,20	11,79	7,43	39,18	19,59	55,41	39,18	117,54	58,77
Линейное увеличение фототубуса $\beta_T=2,5$										
20,00	0,40	0,69	13,75	34,38	181,39	90,70	256,53	181,39	544,18	272,09
40,00	0,65	0,42	16,92	42,31	223,25	111,63	315,73	223,25	669,76	334,88
50,00	0,80	0,34	17,19	42,97	226,74	113,37	320,66	226,74	680,23	340,11
63,00	0,85	0,32	20,38	50,96	268,89	134,44	380,27	268,89	806,67	403,33
100,00	0,95	0,29	28,95	72,37	381,88	190,94	540,06	381,88	1145,65	572,82
100,00*	1,30	0,21	21,15	52,88	279,07	139,53	394,66	279,07	837,20	418,60
125,00	0,95	0,29	36,18	90,46	477,35	238,68	675,08	477,35	1432,06	716,03
150,00	0,95	0,29	43,42	108,55	572,82	286,41	810,09	572,82	1718,47	859,23
250,00	0,95	0,29	72,37	180,92	954,71	477,35	1350,16	954,71	2864,12	1432,06
20,00*	0,80	0,34	6,88	17,19	90,70	45,35	128,26	90,70	272,09	136,05
40,00*	1,30	0,21	8,46	21,15	111,63	55,81	157,86	111,63	334,88	167,44
60,00*	1,40	0,20	11,79	29,46	155,48	77,74	219,88	155,48	466,44	233,22

с числовой апертурой 0,9—0,95 приводит к противоположным последствиям — увеличивается значение p_0' , снижаются требования по минимизации периода ФЧЭ ЦК и тем самым расширяются возможности применения ЦК с фильтром Байера и полноцветных ЦК в микроскопах.

Выводы

1. Предложена методика выбора цифровой камеры для оптического микроскопа, которая базируется на согласовании пространственной разрешающей способности микроскопа и периода фоточувствительных элементов ЦК. Степень согласования может быть оценена коэффициентом использования ПРС, который равен отношению минимального пространственного периода гармонической составляющей в плоскости изображения микроскопа к двум максимальным периодам пространственной дискретизации изображения в ЦК. Выполнение условия равенства коэффициента использования ПРС единице позволяет осуществить правильный подбор ЦК для конкретного микроскопа.

2. Введены понятия полезного, пустого (бесполезного) и недостаточного линейного увеличения в цифровой микроскопии. Условием полезного увеличения является равенство коэффициента использования ПРС микроскопа единице. В случае пустого (бесполезного) линейного увеличения, когда ЦК имеет избыточный запас по ПРС по сравнению с ПРС микроскопа, этот коэффициент существенно больше единицы. А в случае недостаточного линейного увеличения, когда ЦК ухудшает ПРС микроскопа, — существенно меньше единицы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hand W. G. A practical guide to digital microscopy // Photonics Spectra.— 2001.— N 11.— P. 100—104.

2. Borelli A. Digital imaging facilitates photomicrography // EuroPhotonics.— 2001.— N 4.— P. 46—47.
 3. Михель К. Основы теории микроскопа / Под ред. Г. Г. Слюсарева.— М.: Машиностроение, 1955.
 4. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы.— Л.: Машиностроение, 1967.
 5. Holst G. C. Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition.— Bellingham: SPIE Press, 1998.
 6. Vollmerhausen R. H., Driggers R. G. Analysis of sampled imaging systems.— Bellingham: SPIE Press, 2000.
 7. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах.— Л.: Машиностроение, 1989.
 8. Бергер И., Гельбке Е., Мелисс Г. Практическая микрофотография.— М.: Мир, 1977.
 9. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование.— Л.: Машиностроение, 1976.
 10. Benamati B. L. In search of the ultimate image sensor // Photonics Spectra.— 2001.— N 9.— P. 132—136.
 11. Chi-Shao S., Mathur B.P., Stanley D. L., Chang M. F. Figure of merit characterizes electronic imager performance // Laser Focus World.— 2002.— N 6.— P. 107—111.
 12. Color correction for image sensors. Application notes MTD/PS-0534. Rev. 1.— Tokyo: Kodak Co, 2003.
 13. Polaroid digital microscope camera. User guide.— Cambridge: Polaroid Co, 1997.
 14. Micro imager II — digital CCD camera for microscope. Product description.— Burnaby: Quantitative imaging Co, 2000.
 15. Fuji high resolution digital camera HC-2000. Product description.— Tokyo: Fuji Photo Film Co, 1996.
 16. Digital camera system Spot RT. Product description.— Sterling Heights: Diagnostic Instruments, Inc., 2000.
 17. AxioCam HRc. The camera that challenges your microscope. Product description.— Göttingen: Carl Zeiss Light Microscopy, 2003.
 18. Leica digital camera systems. Technical data.— Heerbugg: Leica Microsystems Ltd., 2002.
 19. Digital eclipse DXM 1200F. Ultra high quality digital cameras for photographic use. Product description.— Kawasaki: Nikon Co, 2003.
 20. Digital camera Olympus PD70. Product description.— Tokyo: Olympus Optical, Co, 2003.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2004 ГОДУ

➤ 30 июня — 90 лет со дня рождения В. Н. Челомея (1914—1984), ученого в области механики и процессов управления, конструктора авиационной и ракетно-космической техники.
 ➤ 10 июля — 70 лет со дня начала испытаний (1934) первой советской радиолокационной станции "Рашид".
 ➤ 16 июля — 90 лет со дня рождения (1914) Н. И. Чистякова, ученого-радиотехника, изобретателя и историка радиотехники.
 ➤ 27 июля — 90 лет со дня рождения С. В. Бородича (1914—1996), ученого, создателя систем радиорелейной и спутниковой связи.
 ➤ 31 июля — 40 лет назад (1964) состоялась первая передача телевизионных изображений лунной поверхности при сближении космического аппарата "Рейнджер-7" (США) с Луной.
 ➤ 15 августа — 80 лет со дня выхода (1924) первого номера журнала "Радиолобитель", предшественника журнала "Радио".
 ➤ 16 августа — 75 лет со дня рождения (1929) Д. Д. Кловского, ученого в области радиотехники и связи.
 ➤ 24 августа — 10 лет назад (1994) впервые в мире состоялся прямой ТВ-репортаж с Северного полюса.

➤ 13 октября — 75 лет со дня рождения (1929) В. И. Татарского, ученого-радиофизика, одного из создателей статистической радиофизики.
 ➤ 15 октября — 75 лет со дня рождения (1929) Н. В. Карлова, ученого в области радиофизики и квантовой электроники.
 ➤ 24 октября — 200 лет со дня рождения В.-Э. Вебера (1804—1891), немецкого физика, создателя абсолютной системы электрических и магнитных единиц.
 ➤ 2 ноября — 120 лет со дня рождения М. В. Шулейкина (1884—1939), ученого в области радиотехники, создателя первой отечественной научной школы радиотехников.
 ➤ 16 ноября — 75 лет назад (1929) американский ученый В. К. Зворыкин подал заявку на изобретенную им телевизионную приемную электронно-лучевую трубку кинескоп.
 ➤ 17 декабря — 100 лет со дня рождения Г. З. Айзенберга (1904—1994), ученого и изобретателя в области антенных устройств.
 ➤ 29 декабря — 100 лет со дня рождения В. М. Тучкевича (1904—1997), ученого в области физики и техники полупроводников, одного из создателей производства силовых полупроводниковых приборов.