

## ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.7

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЗОРНОЙ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ, ВСТРОЕННОЙ В ЭЛЕКТРОННЫЙ ТАХЕОМЕТР ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА; канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ  
(Полоцкий государственный университет);  
Д.О. ВОЛКОВ

(Витебское агентство по государственной регистрации и земельному кадастру)

Рассмотрена возможность использования снимков, полученных с помощью цифровой камеры, встроенной в тахеометр в строительстве. Объектив цифровой камеры мал, возможно, состоит из одной линзы, поэтому будет давать большие искажения, обусловленные дисторсией. Для уменьшения искажений необходимо калибровать цифровую камеру в ходе, которой определять не только элементы внутреннего ориентирования, но и величины дисторсии по полю изображения. В этом случае можно будет использовать цифровую камеру как для составления абрисов, так и для создания панорамы сооружения или создания плана фасада здания, хотя и пониженной точности.

**Ключевые слова:** фотограмметрия, цифровая камера, тахеометр, дисторсия, искажения.

В современных условиях с развитием цифровых технологий улучшаются характеристики цифровых камер. Качество изображения, получаемое с помощью цифровых камер, повышается, снижается энергопотребление, и камеры, при необходимости, могут обладать сравнительно небольшими размерами. Это привело к тому, что стали все чаще применять цифровые камеры, встроенные в тахеометры, которые упрощают производство полевых и камеральных работ. Последнее время фирма LEICA выпускает электронные тахеометры со встроенной цифровой камерой. Примером такого тахеометра может служить тахеометр *LeicaNovaMS50*, внешний вид которого показан на рисунке 1 [1].

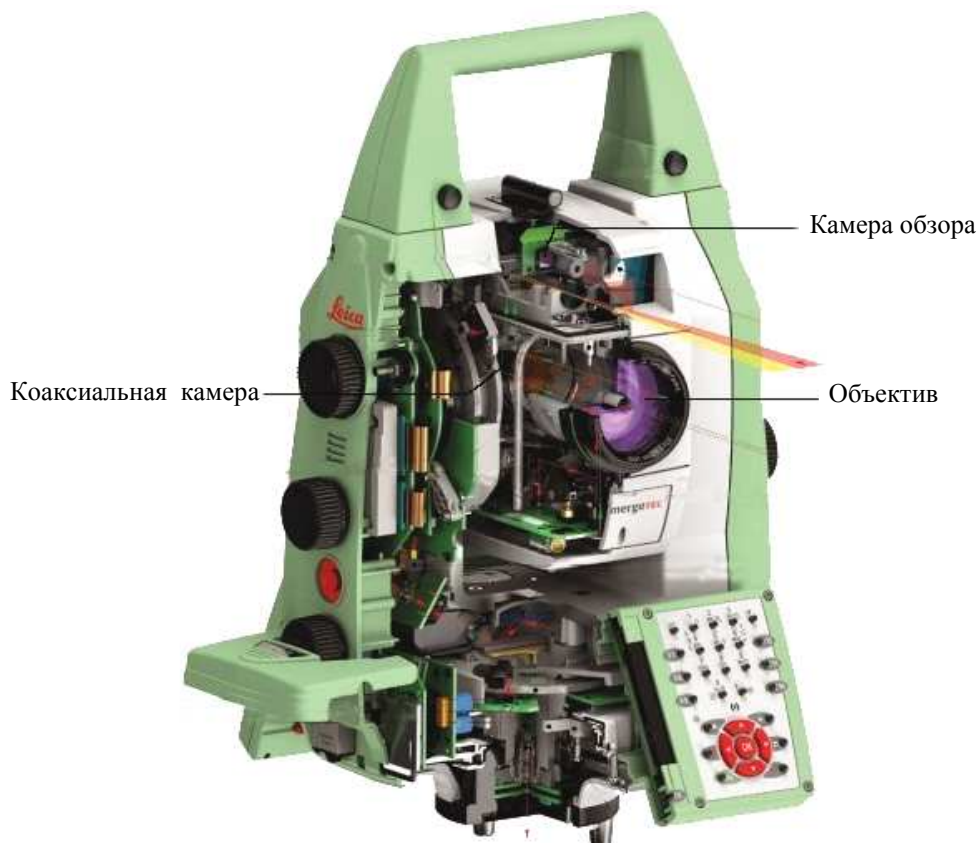


Рисунок 1. – Электронный тахеометр со встроенной цифровой камерой

Обзорная камера служит для предварительного наведения. Снимки, полученные этой камерой, могут использоваться в качестве абриса.

Технические характеристики обзорной камеры приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1. – Технические характеристики обзорной цифровой камеры

Технические характеристики, наименование	Технические характеристики, значения
Тип датчика	CMOS (5 Мп)
Фокусное расстояние, мм	21
Поле зрения	15,5°×11,7° (19,4° по диагонали)

От параметров объектива цифровой камеры и ее светочувствительной матрицы зависит качество получаемого изображения. Рассмотрим влияние этих параметров.

*Объективы* – оптические устройства, проецирующие изображения на плоскость. Обычно состоят из набора линз, рассчитанных для взаимной компенсации аберраций и собранных в единую систему внутри оправы [3]. Большинство аберраций влияет на качество изображения, а дисторсия объектива – на геометрию построенного изображения. Дисторсия приводит к нарушению подобия между предметом и изображением. Как отмечают авторы [4], искажения, обусловленные дисторсией объектива цифровой камеры, могут внести искажения в полученные координаты до 500 мкм.

При фотограмметрических построениях требуется высокая точность окончательных результатов, которых невозможно достичь при большой дисторсии. Влияние дисторсии может быть уменьшено путем проведения калибровки и определения не только элементов внутреннего ориентирования камеры, но и поправок за дисторсию. В ходе калибровки были определены углы между визирной осью тахеометра и оптической осью цифровой камеры и отрезки между центром вращения тахеометра и главной точкой объектива. Однако калибровка самой цифровой камеры, т.е. определение элементов внутреннего ориентирования камеры и величин дисторсии по полю изображения, не выполнялась.

Для уменьшения дисторсии устанавливают диафрагму строго посередине между линзами объектива. Из рисунка 1 видно, что объектив камеры обзора очень мал и вряд ли состоит из системы линз, компенсирующих аберрации, кроме того в характеристиках цифровой камеры (таблица 1) не указан диаметр относительного отверстия и есть ли диафрагма вообще. Полагаем, что диафрагмой служит оправка объектива. Относительное отверстие играет важную роль при энергетических расчетах объектива и влияет на качество изображения [5]. Величина относительного отверстия объектива рассчитывается по формуле [5; 6]:

$$\frac{1}{n} = \frac{d}{f}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр действующего отверстия объектива;  $f$  – величина фокусного расстояния.

Примем за диаметр действующего отверстия объектива  $d$  внутренний размер оправы, величина фокусного расстояния приведена в таблице 1, тогда  $1/n = 1/9,1$ . При конструировании аэрофотоаппаратов принимают  $n = 4 \dots 9$ . При  $n$  менее четырех снижается качество изображения, так как велико влияние аберрации, а при  $n$  более 9-ти на качество изображения влияет дифракция [6; 7].

Вследствие дифракции лучи света отклоняются от первоначального направления. В результате реальная оптическая система изображает точку предмета не точкой, а в виде так называемого дифракционного кружка, представляющего собой серию чередующихся светлых и темных концентрических колец с ярким центральным пятном (рисунком 2) [8].



Рисунок 2. – Дифракционный кружок

Если оптическая система изображает две близкие между собой точки, дифракционные кружки от каждой из них, налагаясь один на другой, образуют сложную дифракционную картину.

Если допустить, что два дифракционных кружка накладываются один на другой так, что максимум (центральное светлое пятно) одного кружка совпадает с первым минимумом (первым темным кольцом) другого, т.е. расстояние между центрами обоих дифракционных кружков равно радиусу  $\sigma$  первого темного кольца. В этом случае распределение освещенности в сложной дифракционной картине представляется огибающей  $ACB$ , изображенной на рисунке 3 [8].

Как видим, дифракционная картина состоит из двух максимумов в точках  $A$  и  $B$  и одного минимума в точке  $C$  и составляет 74% освещенности в точках  $A$  и  $B$ . При такой разнице в освещенности наблюдатель еще может раздельно видеть два максимума, а следовательно и две точки [8].

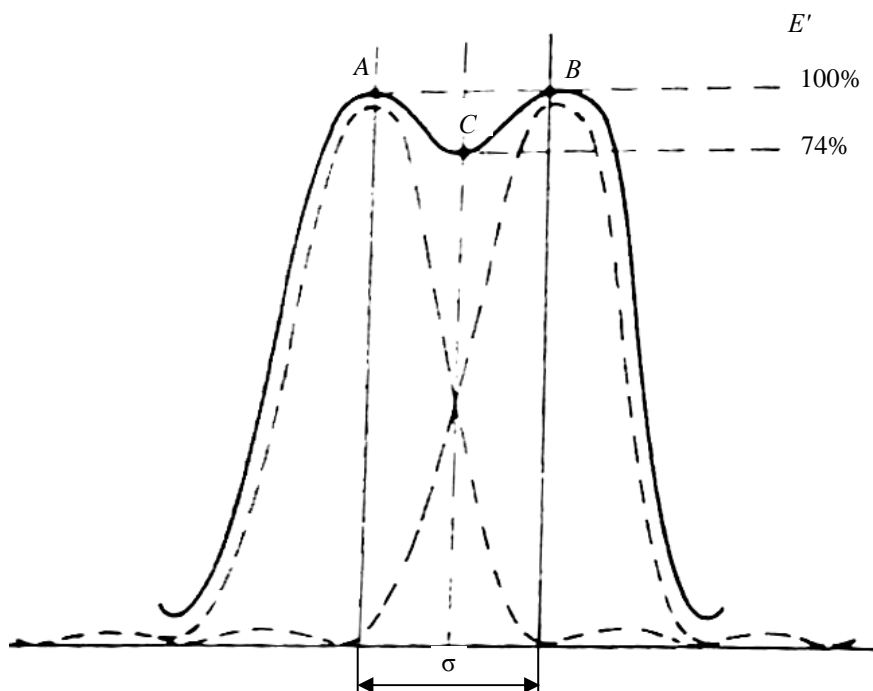


Рисунок 3. – Распределение освещенности

Радиус  $\sigma$  первого темного кольца дифракционного кружка принимается за наименьшее разрешаемое расстояние (предел разрешения), которое может быть вычислено по следующей формуле [8]:

$$\sigma = 1,22\lambda \frac{f}{d} = 1,22\lambda n, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $f$  – фокусное расстояние;  $d$  – диаметр входного зрачка оптической системы;  $n$  – знаменатель относительного отверстия (апертура).

Как видно из формулы (2), наименьшее разрешаемое расстояние зависит от длины волны  $\lambda$  и апертуры  $n$ . Длина волны, которую фиксируют светочувствительные матрицы, будет отличаться от длины волны, которую фиксирует фотопленка, поскольку матрицы будут фиксировать не только видимый свет, но и инфракрасный. Поэтому возьмем для расчетов среднюю длину световой волны, воспринимаемую светочувствительной матрицей, которая составит  $\lambda = 0,69$  мкм.

Подставив  $\lambda = 0,69$  мкм,  $f = 21$  мм и  $n = 9,1$  в формулу (2), получим  $\sigma = 7,66$  мкм. Нет смысла конструировать матрицу с размером пикселя значительно меньше рассчитанной величины (таблица 2).

Характеристики светочувствительной матрицы имеют существенное значение. В цифровой камере тахеометра Leica Nova MS50 используется датчик изображения МТ9Р031, который представляет собой 1/2.5-дюймовый цифровой датчик изображения КМОП (комплементарная структура «металл – оксид – полупроводник») с активным пиксельным массивом  $2592 \times 1944$  [2].

В рассматриваемой камере светочувствительная матрица КМОП также имеет датчик изображения ПЗС (прибор с зарядовой связью). Сравним два этих датчика, чтобы выяснить, оправдан ли выбор

для цифровой камеры КМОП-матрицы. В ПЗС- и КМОП-матрицах для преобразования света в электрический сигнал изображения используются фотодиоды. Однако их принцип работы существенно различается. В приборах с зарядовой связью падающий свет, регистрируемый фотодиодом каждого пикселя, преобразуется в электрический заряд. Заряд пикселя перемещается в вертикальную «транспортную шину», расположенную сбоку от пикселя. Прилагаемое напряжение затем перемещает заряды по вертикальным и горизонтальным транспортным шинам, пока они не достигнут усилителя, в котором заряды преобразуются в электрический сигнал (рисунок 4) [9].

Таблица 2. – Технические характеристики светочувствительной матрицы [2]

Параметры	Характеристика
Оптический формат	1/2,5-дюймовый (4:3)
Активный размер изображения	5,70 мм (H) × 4,28 мм (V) 7,13 мм диагональ
Активные пиксели	2592H × 1944V
Размер пикселя	2,2 × 2,2 мкм
Массив цветных фильтров	Цветовая модель RGB
Разрешение ADC	12 бит, на кристалле
Чувствительность	1,4 В/люкс (550 нм)
Динамический диапазон пикселей	70,1 дБ
SNR <sub>max</sub>	38,1 дБ

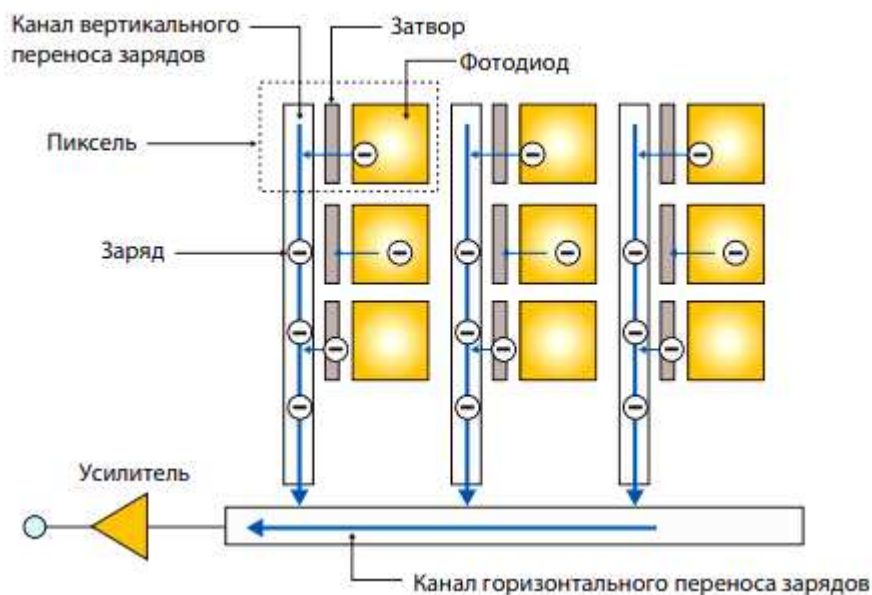


Рисунок 4. – Структура ПЗС-матрицы

Подобная структура требует высоких напряжений для попеременного открывания и закрывания затворов, которые должны иметься в составе всех пикселей для управления временной последовательностью потока зарядов. Мощность, потребляемая ПЗС-матрицами, особенно велика для формата высокой четкости, когда требуется быстрое считывание большого числа пикселей [9].

В КМОП-матрицах усилитель, имеющийся у каждого пикселя, сразу преобразует заряд пикселя в электрический сигнал, который затем продвигается на выход (рисунок 5) [9].

Вместо затворов в КМОП-матрице используются переключатели и внутренние цепи, управляющие последовательностью выходных сигналов. Использование внутренних переключателей позволяет существенно снизить потребляемую мощность при ускорении процесса одновременного считывания большого числа пикселей. Эффективность считывания оказывается вполне достаточной для поддержки прогрессивного разложения изображений высокого разрешения. В одночиповых КМОП-датчиках становится принципиально возможным одновременное считывание сигналов  $R(\text{red})$ ,  $G(\text{green})$  и  $B(\text{Blue})$ .

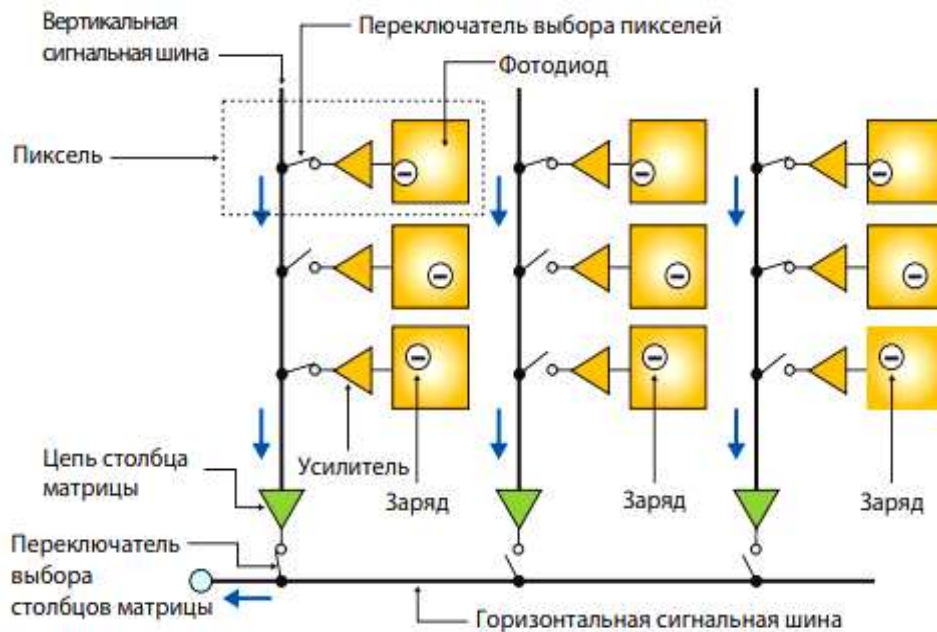


Рисунок 5. – Структура КМОП-матрицы

Поскольку КМОП-датчики отличаются низким энергопотреблением и высокой скоростью процесса считывания, они вполне подходят для использования в камерах с высоким разрешением (англ. – High Definition (HD)), полностью удовлетворяя предъявляемые к ним требования, такие как компактность, малая потребляемая мощность и высокое качество изображения [9].

Исходя из вышесказанного, можно выделить преимущества КМОП-матриц в сравнении с ПЗС [9]:

- низкое энергопотребление;
- малая потребляемая мощность;
- малозатратное производство, особенно при больших размерах матриц.

К основным недостаткам КМОП-матриц относят следующие [10]:

- фотодиод ячейки матрицы имеет сравнительно малый размер, величина же получаемого выходного напряжения зависит не только от параметров самого фотодиода, но и от свойств каждого элемента пикселя. У каждого пикселя матрицы своя собственная оптическая плотность, отсюда возникает проблема разброса светочувствительности и коэффициента контраста пикселей матрицы. Вследствие этого КМОП-матрицы имеют высокий уровень «структурного шума»;

- наличие на матрице большого по сравнению с фотодиодом объема электронных элементов, что создает дополнительный нагрев устройства в процессе считывания и приводит к возрастанию теплового шума.

Шум имеет различную природу. Рассмотрим *типичные источники шума*.

*Электрические флуктуации* – хаотические изменения потенциалов, токов и зарядов в электрических цепях, вызываемые тепловым движением носителей заряда и другими физическими процессами в веществе, обусловленными дискретной природой электричества, а также случайными изменениями и нестабильностью характеристик цепей. Флуктуации возникают в проводниках, электронных и ионных приборах. Они приводят к появлению ложных сигналов – шумов на выходе усилителей электрических сигналов, ограничивают их чувствительность и помехоустойчивость, уменьшают стабильность генераторов и устойчивость систем автоматического регулирования и т.д. [11].

*Фиксированный структурный шум* возникает в результате того, что КМОП-матрицы имеют отдельный усилитель для каждого пикселя. В устройстве высокой четкости КМОП матрица содержит более миллиона таких усилителей. Нереально ожидать, что все эти усилители будут абсолютно одинаковыми, так как в процессе производства неизбежен некоторый разброс параметров, что приведет к возникновению помех [10].

*Аналоговый шум* возникает, когда заряд передается в форме аналогового сигнала. В процессе передачи в него вносится некоторый внешний шум. Этот шум возрастает пропорционально расстоянию передачи [9].

Поскольку шум в КМОП-матрице является существенным недостатком, то производители стремятся разработать технологии, позволяющие свести этот недостаток к минимуму.

Авторы работы [2] утверждают, что датчик изображения КМОП МТ9Р031 оснащен технологией малошумящего формирования BREAK-Artina, что позволяет достичь качества изображения ПЗС (на основе соотношения сигнала к шуму и низкой чувствительностью к освещенности) при сохранении присущих им размеров, стоимости и преимущества интеграции КМОП. Это утверждение, на наш взгляд, сомнительно.

Так как шум малоинформативная характеристика, в электронике принято говорить об отношении сигнал/шум. В светочувствительных матрицах эта характеристика обозначается как *Signalto Noiseratio*, или сокращенно *SNR*.

В светочувствительной матрице МТ9Р031 отношение сигнал/шум равно 38,1дБ (см. таблицу 2) [2].

Значение *SNR* менее 40 дБ означает высокий уровень шумов и, как следствие, низкое качество изображения [12].

Как утверждается в [12], почти все камеры потребительского уровня будут выполнены на базе КМОП-приборов, а ПЗС будут применяться в устройствах среднего и высокого классов. В основном все недостатки КМОП-матриц решаются программными методами, т.е. постобработкой фотографий, что приводит к потере исходной информации [10].

Рассчитаем разрешающую способность получаемого изображения. При расчете учтем размер пикселя светочувствительной матрицы обзорной камеры и влияние аберраций объектива.

Разрешающая способность светочувствительной матрицы может быть вычислена по формуле [7]:

$$R_m = \frac{1}{2l}, \quad (3)$$

где  $l$  – размер пикселя.

При расчете примем размер пикселя 5 и 2,2 мкм.

В первом случае получим  $R_1 = 100 \text{ мм}^{-1}$ , во втором –  $R_2 = 227 \text{ мм}^{-1}$ .

Предельно возможное значение разрешающей способности объектива, называемое дифракционной разрешающей способностью  $R_D$ , можно получить по формуле [6; 8]:

$$R_D = \frac{1d}{1,22\lambda f} = \frac{1}{1,22\lambda n}. \quad (4)$$

Приняв среднее значение  $\lambda = 0,69 \text{ мкм}$ ,  $n = 9,1$ , получено  $R_D = 130 \text{ мм}^{-1}$ .

Аберрации снизят эту разрешающую способность.

Влияние аберраций учтем по формуле [14]:

$$R_o = \frac{U}{4\epsilon}, \quad (5)$$

где  $U$  – апертурный угол в пространстве изображений;  $\epsilon$  – волновая аберрация, используемая в качестве обобщенной характеристики остаточных аберраций и  $\epsilon = 0,25\lambda$  – для оптических систем с отличной коррекцией аберраций и  $\epsilon = 0,5\lambda$  – для хорошей коррекции аберраций. В нашем случае аберрации не корректировались, поэтому примем  $\epsilon = \lambda$ .

Апертурный угол в пространстве изображений можно вычислить по формуле [14]:

$$U = \frac{d}{2f} = 0,055. \quad (6)$$

Получим разрешающую способность объектива  $R_o$  по формуле (5) для принятых нами значений  $R_o = 15 \text{ мм}^{-1}$ .

Совместную разрешающую способность светочувствительной матрицы и объектива вычислим по формуле [14]:

$$\frac{1}{R_{o/m}} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_m}. \quad (7)$$

При размере пикселя  $l = 5 \text{ мкм}$  получили  $R_{o/m} = 13 \text{ мм}^{-1}$ , а при  $l = 2,2 \text{ мкм}$   $R_{o/m} = 14 \text{ мм}^{-1}$ , то есть практически одинаковый результат. Однако при размере пикселя 2,2 мкм в значительно большей степени

на окончательную разрешающую способность будут влиять шумы и скорее всего разрешающая способность будет ниже, чем при размере пикселя 5 мкм.

В рассматриваемой камере используется светочувствительная матрица с размером пикселя 2,2 мкм. Проведя вычисления наименьшего разрешающего расстояния, получили значение 7,7 мкм. Одна точка будет размером 7,7×7,7 мкм, т.е. займет более чем 3×3 пикселя. Полагаем, что можно увеличить размер пикселя (например, до 5 мкм), что снизило бы шумы и улучшило соотношение сигнал/шум.

Из этого можно сделать вывод о том, что матрица с размером пикселя не больше 7,7 мкм обладает теми же характеристиками, что и матрица в рассматриваемой камере. В таком случае было бы меньше пикселей, а значит и меньше электрических элементов, что улучшит соотношение сигнал/шум.

*Цветное изображение* получаем с помощью светочувствительной матрицы, используя светофильтры. Изображение выводится в формате шаблона Bayer, состоящего из четырех «цветов»: зеленый G<sub>r</sub>; зеленый G<sub>b</sub>, красный R и синий B (G<sub>r</sub>, G<sub>b</sub>, R, B), основанных на трех фильтрах цвета [2].

Поток света, проникая через микролинзы, разделяется светофильтрами на синюю (B), зеленую (G<sub>r</sub>, G<sub>b</sub>) и красную (R) составляющие, а затем поступает на фотодиоды. Наличие микролинз обусловлено стремлением повысить чувствительность датчика путем фокусировки большего числа фотонов на фотоэлементе (рисунок 6) [15]. Использование светофильтров снизит разрешающую способность.

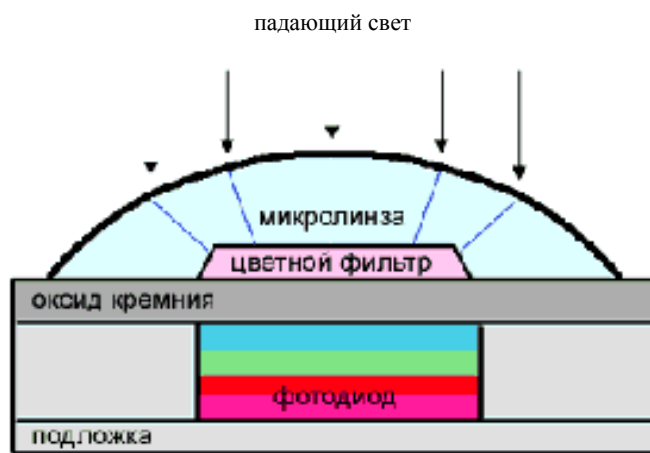


Рисунок 6. – Разделение потока света светофильтрами

### Заключение

Обзорная камера в тахеометре предназначена для предварительного наведения на объект, соответствует своему назначению. Что касается использования этой камеры для получения изображений с последующим измерением по ним при составлении планов здания, то в координаты на снимках будут внесены большие искажения. Однако по снимкам, полученным этой камерой, можно получить кроме абриса и панораму изображения, а если выполнить калибровку самой камеры, то и план фасада здания, хотя и пониженной точности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электронные данные. – Режим доступа: [http://www.navgeocom-yug.ru/catalog/seriya\\_ts30/takheometr\\_leica\\_nova\\_ms50](http://www.navgeocom-yug.ru/catalog/seriya_ts30/takheometr_leica_nova_ms50).
2. Техническая документация компании Artina. Светочувствительная матрица MT9P031.
3. Объектив [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Объектив>.
4. Михайлов, А.П. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии [Электронный ресурс] / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев, В.М. Курков. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=321>.
5. Савиных, В.П. Аэрокосмическая аэрофотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М. : «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 1997. – 378 с.
6. Лаврова, Н.П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко. – М. : Недра, 1981. – 296 с.

7. Щербаков, Е.Я. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Е.Я. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1979. – 464 с.
8. Мальцев, М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М. : Машиностроение, 1968. – 472 с.
9. Техническая документация компании SONY. Технология матриц ClearVid.
10. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/КМОП-матрица>.
11. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/флуктуации>.
12. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia/отношение сигнал/шум>.
13. Павлушко, О.В. Цифровые фотоаппараты: сравнительные характеристики и применение [Электронный ресурс] / О.В. Павлушко. – Режим доступа: [http://ict.edu.ru/ft/001835/sbornik6\\_4\\_4\\_7\\_1](http://ict.edu.ru/ft/001835/sbornik6_4_4_7_1).
14. Кучко, А.С. Аэрофотография и специальные аэрофотографические исследования / А.С. Кучко. – М. : Недра, 1988. – 235 с.
15. Твердотельные датчики изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php ?ID=40146>

Поступила 08.06.2017

#### EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF APPLYING A SURVEY DIGITAL CAMERA BUILT IN THE ELECTRICAL TACHEOMETER FOR PHOTOGRAMMETRY

A. MIKHEEVA, D. YALTYKHOV, D. VOLKOV

*The possibility of using the images obtained with the help of a digital camera built into the total station in construction is considered. The lens of the digital camera is small, perhaps, consists of a single lens, so it will give large garblings due to distortion. To reduce distortions, it is necessary to calibrate the digital camera in the course, which not only determine the elements of internal orientation, but also the magnitude of the distortion along the image field. In this case, it will be possible to use a digital camera not only to compose outlines, but also to create a panorama of the structure or to create a plan for the facade of the building, albeit with lower accuracy.*

**Keywords:** photogrammetry, digital camera, total station, distortion, garbling.