

Выбор тест-объекта для оценки разрешающей способности цифровых оптико-электронных систем мониторинга земной поверхности

77-30569/364381

04, апрель 2012

Веселов Ю. Г., Данилин А. А., Тихонычев В. В.

УДК 778.35:629.7

МГТУ им. Н.Э. Баумана

vesel_foto@mail.ru

ksandrdan@rambler.ru

v_tikhonychev@mail.ru

Продолжается бурное развитие электроники различного назначения. На смену аналоговым оптико-электронным системам мониторинга земной поверхности (МЗП) приходят цифровые оптико-электронные системы (ОЭС) МЗП.

В отличие от пленочных, в цифровых ОЭС, в качестве приемника оптического излучения (ПОИ) используются матрицы элементарных светочувствительных элементов с четко упорядоченной регулярной структурой, как показано на рисунке 1. Процесс формирования изображения в цифровых ОЭС существенно отличается от процесса формирования изображения в аналоговых оптико-электронных системах.

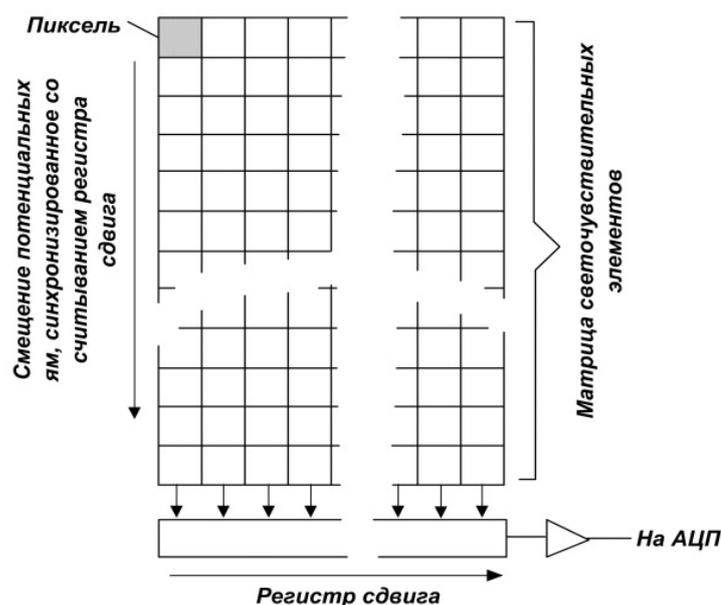


Рисунок 1 – Полнокадровый матричный ПОИ

Все выше сказанное определяет требования к идеологии построения, структуре, методике применения тест-объектов, используемых при оценке технических характеристик цифровых ОЭС МЗП.

Фотографическое изображение на фотопленке, показанное на рисунке 2, дискретно по своей структуре. Отдельно воспринимаемые элементы этой структуры представляют собой случайные скопления и разряжения зерен серебра, образовавшиеся в результате проявления микрокристаллов галоидного серебра. Имея ввиду дискретную структуру фотографического изображения, пользуются терминами «зернистость» и «гранулярность». Термин «зернистость» употребляют, если речь идет о визуальном (субъективном) восприятии структуры изображения, термин «гранулярность» – если речь идет об объективном содержании этого явления.

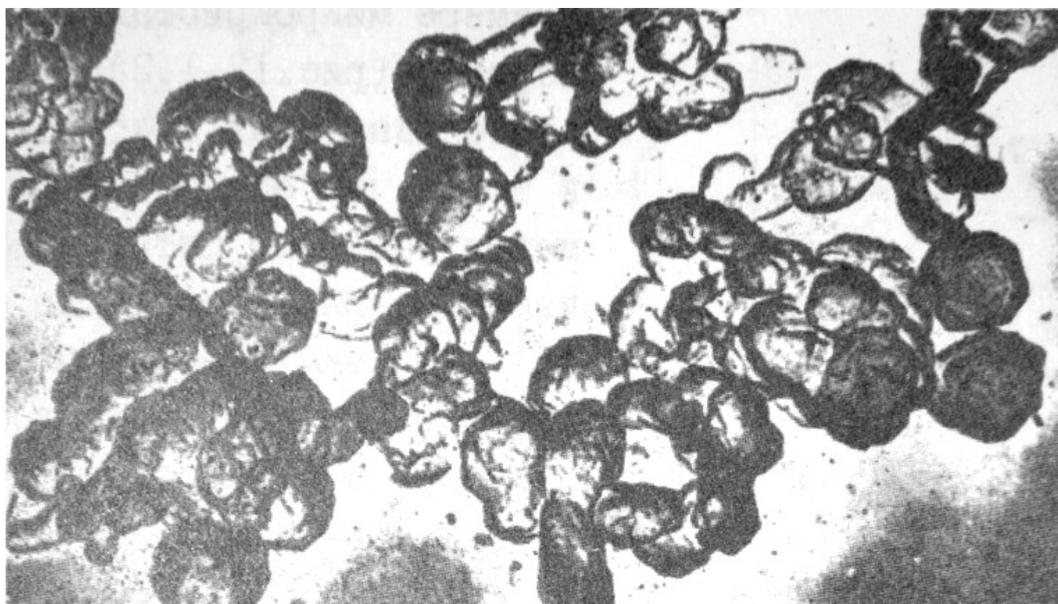


Рисунок 2 – Зернистая структура изображения на фотопленке

Используемые в качестве приемника оптического излучения цифровых ОЭС, матричные (линейные) фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) либо комплементарные структуры метал-оксид-полупроводник (КМОП) имеют регулярную структуру и определенный физический размер элемента ПОИ. По этой причине важным является вопрос эффективности использования для оценки разрешающей способности штриховых тест-объектов, имеющих определенную угловую ориентацию относительно регулярной структуры приемника оптического излучения. То есть использование для оценки характеристик цифровых оптико-электронных систем штриховых тест-объектов, предназначенных для тестирования аналоговых ОЭС, необходимо обосновать с проведением оценки точности.

Например, использование миры Ащеулова, изображенной на рисунке 3, для оценки разрешающей способности цифровых оптико-электронных систем, в отличие от пленочных, дает необъективный результат, так как группы штрихов с различной пространственной частотой, ориентированные под разными углами относительно упорядоченного расположения элементов ПОИ, не позволят получить адекватную оценку разрешающей способности исследуемой ОЭС. Для случайной дискретной структуры фотопленки такое расположение штрихов не оказывает существенного влияния на достоверность полученной оценки.



Рисунок 3 – Мира Ащеулова

В отличие от штриховых тест-объектов, радиальные и кольцевые концентрические миры имеют непрерывный характер изменения пространственной частоты во всех направлениях относительно стороны приемника оптического излучения.

Оценить эффективность использования различных типов тест-объектов для определения пространственно-частотных характеристик цифровых ОЭС могут позволить натурные эксперименты, по результатам которых имеется возможность проведения сравнительной оценки значений разрешающей способности исследуемых оптико-электронных систем по штриховым (ахроматическим и цветным), радиальной и кольцевым мирам.

Размеры матричных ФПЗС обычно в разы меньше диаметра оптики, в совокупности с которой они используются. Такое соотношение размеров ФПЗС и диаметра оптики сводит к минимуму неравномерность пространственно-частотных характеристик по полю кадра, но уменьшает угол поля зрения цифровой ОЭС, построенной по принципу «одна матрица – один объектив». В цифровых оптико-электронных системах имеется возможность получения цветного изображения.

В качестве одного из основных критериев оценки эффективности применения ОЭС МЗП используется линейное разрешение на местности L_m :

Линейное разрешение на местности связано с разрешающей способностью оптико-электронной системы известным выражением:

$$L_m = \frac{H}{2Rf},$$

где L_m – линейное разрешение системы на местности, м;

R – разрешающая способность системы, мм^{-1} ;

H – высота аэрофотосъемки, м;

f – фокусное расстояние системы, мм.

Разрешающая способность является пространственно-частотной характеристикой фотографической системы и может определяться методом визуального дешифрирования после фотографирования тест-объектов – мир. Определение разрешающей способности ОЭС МЗП данным методом проводится как в лабораторных, так и в летных условиях.

К традиционным тест-объектам относятся ахроматические миры заданного контраста с равномерной спектральной характеристикой, показанные на рисунке 4.

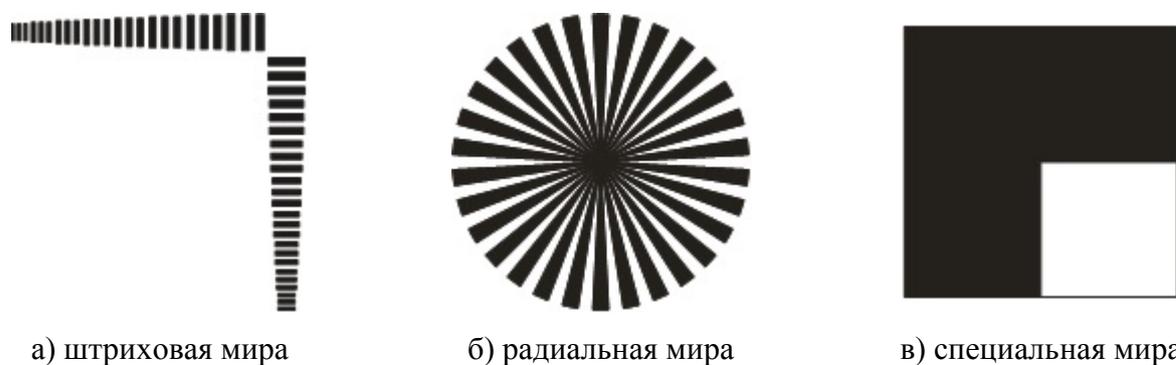


Рисунок 4 – Традиционные тест-объекты

Расчетные формулы для разрешающей способности в лабораторных условиях при использовании коллиматора определяются видом используемых тест-объектов. Использование коллиматора обусловлено необходимостью обеспечения квазипараллельности лучей светового потока на входе в оптическую систему ОЭС.

Штриховая мира:

$$R = N_{np} \cdot \frac{f_{кол.}}{f_{об.}}$$

где $N_{пр.}$ – предельная пространственная частота, $мм^{-1}$;

$f_{кол.}$ – фокусное расстояние коллиматора, мм;

$f_{об.}$ – фокусное расстояние объектива, мм.

Радиальная мира:
$$R = \frac{n}{\pi d},$$

где n – число секторов миры;

d – диаметр круга рассеяния миры, мм.

В работе решается задача выбора инструмента измерения разрешающей способности (тест-объекта) цифровых оптико-электронных систем видимого диапазона. От выбора инструмента измерения зависит точность измерения физической величины, то есть близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины [4]. Задача выбора тест-объекта является значимой и в данной работе решается методом физического эксперимента, результаты которого подвергаются статистической обработке.

Описание и результаты лабораторного эксперимента

Для проведения лабораторного эксперимента использовались следующие специально разработанные тест-объекты:

- ахроматическая штриховая мира заданного контраста;
- штриховые красная, зеленая и синяя миры;
- цветной тест-объект специального вида;
- штриховые полупериодные миры;
- тест-объект «оптический sinc»;
- кольцевые миры;
- кольцевая концентрическая мира.

Все тест-объекты располагались на полигоне, фотографирование которого производилось с десяти точек, расположенных вдоль прямой параллельной плоскости полигона, цифровым фотоаппаратом с дистанции 5 м для каждого из четырех фокусных расстояний. Характеристики цифрового фотоаппарата представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики цифрового фотоаппарата

Тип ПОИ	Размер ПОИ, м	Формат кадра, пикс.	Размер элемента ПОИ, м	f, м
матрица, КМОП	$23,7 \cdot 10^{-3} \times 15,6 \cdot 10^{-3}$	3008×2000	$7,839 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-3} - 70 \cdot 10^{-3}$

Лабораторный эксперимент проводился в несколько этапов.

Путем визуального анализа изображений, полученных на каждом этапе, были оценены значения разрешающей способности цифрового фотоаппарата по каждому изображению.

Результаты каждого этапа лабораторного эксперимента были подвергнуты статистической обработке: определены оценки математического ожидания, среднеквадратического отклонения и интервальные оценки разрешающей способности [2, 5]. Доверительные интервалы для математического ожидания разрешающей способности оценивались с использованием распределения Стьюдента по уровню значимости $\alpha = 0,05$.

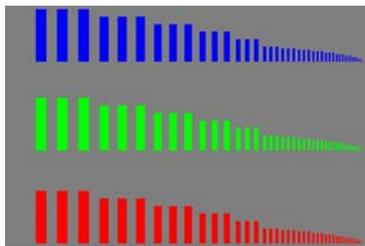
Также в ходе лабораторного эксперимента определялись статистические характеристики шума изображения (среднеквадратическое ожидание шума и радиус корреляции шума), спектральные коэффициенты отражения тест-объектов и спектральная характеристика цифрового фотоаппарата.

Первый этап – использование цветных тест-объектов.

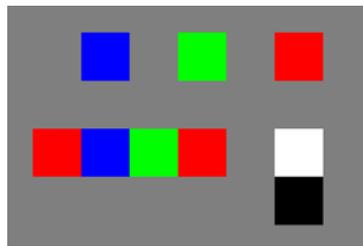
Получение цветного изображения в аналоговых ОЭС было связано с использованием специальных фотопленок, дополнительного оборудования и сложной химико-фотографической обработки. Все это делало процесс получения цветного аналогового изображения дорогостоящим и длительным, что не могло привести к широкому использованию цвета в аэрокосмической фотографии. В цифровых оптико-электронных системах цветное изображение является готовым продуктом, записанным на носитель информации, и может формироваться различными способами: на уровне конструкции ПОИ (оптической системы) и программно-алгоритмического обеспечения аналого-цифрового преобразователя (процессора). Поэтому вопрос эффективной оценки показателей качества цветного цифрового изображения остается открытым, в котором важным моментом является выбор тест-объекта адекватного решаемой задаче.

Для оценки разрешающей способности цифровых ОЭС, формирующих цветное изображение, предлагается использовать цветные тест-объекты (штриховые красную, зеленую, синюю миры и цветной тест-объект специального вида – поля цвета) в сравнении с ахроматической штриховой мирой заданного контраста.

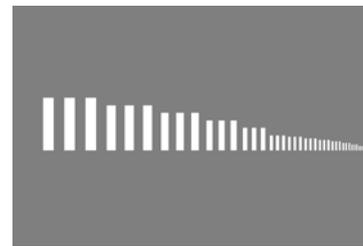
Тест-объекты первого этапа лабораторного эксперимента показаны на рисунке 5.



а) цветные штриховые миры



б) тест-объект специального вида – поля цвета



в) ахроматическая штриховая мира

Рисунок 5 – Тест-объекты первого этапа лабораторного эксперимента

Статистические характеристики результатов эксперимента представлены в таблице 2.

Доверительные интервалы оценок математического ожидания разрешающей способности пересекаются, то есть значения разрешающей способности, полученные по ахроматической и цветным мирам, за исключением зеленой, могут совпадать.

Таблица 2

Статистические характеристики результатов эксперимента

f, мм	ахроматическая мира			красная мира			зеленая мира			синяя мира		
	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε
18	56,8	2,6	1,9	44,4	9,6	7,2	24,4	2,9	2,2	54,4	6,4	4,8
35	46,9	2,2	1,6	41,7	3,5	2,7	20,9	4,0	3,1	44,2	3,6	2,7
50	47,0	4,8	3,6	38,7	2,8	2,1	20,7	1,1	0,8	38,7	2,8	2,1
70	37,3	8,0	6,0	32,4	4,5	3,4	17,3	1,0	0,7	32,4	4,5	3,4

При этом в 70 % случаев разрешающая способность, определенная по ахроматической мире, выше на 19,2 %, то есть $7,7 \text{ мм}^{-1}$, чем разрешающая способность, определенная по красной мире; в 47,5 % случаев разрешающая способность, определенная по ахроматической мире, выше на 11,8 %, то есть $4,6 \text{ мм}^{-1}$, чем разрешающая способность, определенная по синей мире; в 100 % случаев разрешающая способность, определенная по ахроматической мире, выше на 125 %, то есть $26,2 \text{ мм}^{-1}$, чем разрешающая способность, определенная по зеленой мире.

На рисунке 6 представлен цифровой снимок полигона первого этапа лабораторного эксперимента.

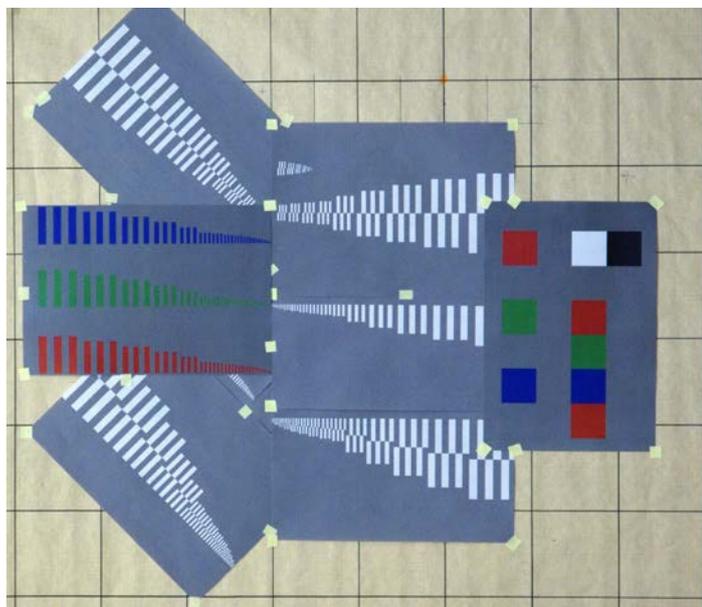


Рисунок 6 – Цифровой снимок полигона первого этапа

По изображениям цветного тест-объекта специального вида были вычислены выходные относительные контрасты ахроматической и цветных мир, статистические характеристики шумов изображения, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Выходные относительные контрасты и $\sigma_{ш.}$, $r_{ш.}$.

Мира	Контраст				$\sigma_{ш.}$	$r_{ш.}$
	Яркость	R канал	G канал	B канал		
Серая	0	0	0	0	1,56	3,85
Белая	-0,33	-0,35	-0,33	-0,3	2,26	7,86
Красная	0,18	-0,13	0,37	0,32	1,69	3,56
Зеленая	0,04	0,14	-0,04	0,23	1,49	3,8
Синяя	0,38	0,99	0,34	-0,05	0,98	4,17

Анализ значений выходных относительных контрастов и статистических характеристик шумов, а также анализ изображений в различных цветовых пространствах, не позволили объяснить явление существенной разницы оценок разрешающей способности, полученных по ахроматической и зеленой мирам. Поэтому для тест-объектов были вычислены входные относительные спектральные контрасты: белого относительно серого, красного относительно серого, зеленого относительно серого, синего относительно серого. Входной относительный спектральный контраст равен:

$$K_{\rho_{\lambda_{\text{цв.}}}} = -\frac{\rho_{\lambda_{\text{сер.}}} - \rho_{\lambda_{\text{цв.}}}}{\rho_{\lambda_{\text{сер.}}} + \rho_{\lambda_{\text{цв.}}}},$$

где $\rho_{\lambda_{\text{сер.}}}$ – спектральный коэффициент отражения серого;

$\rho_{\lambda_{\text{цв.}}}$ – спектральный коэффициент отражения цвета.

Результаты вычислений входных относительных спектральных контрастов образцов представлены в виде графиков зависимостей $K_{\rho_{\lambda_{\text{цв.}}}(\lambda)}$ и спектральной характеристики цифрового фотоаппарата $S(\lambda)$, показанных на рисунке 7.

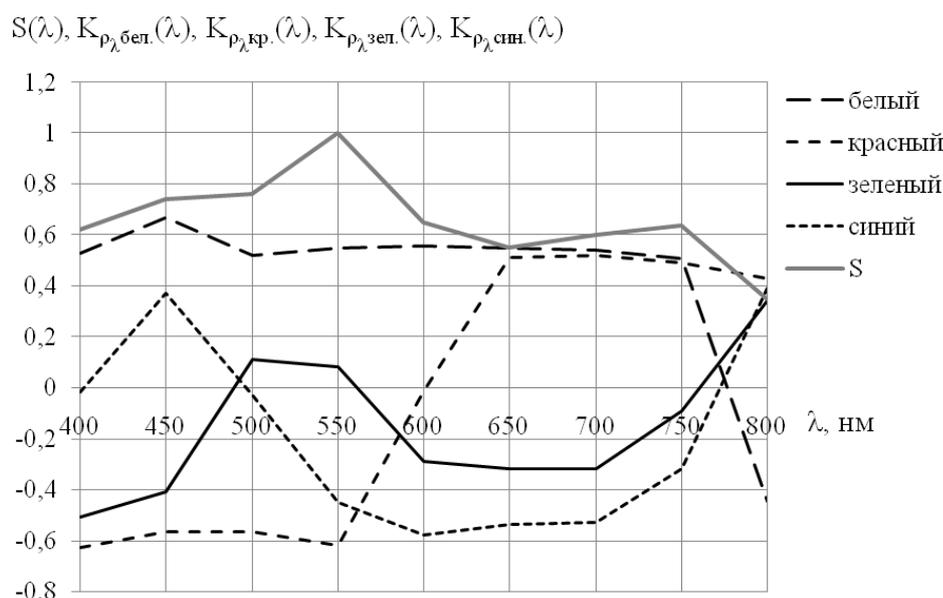


Рисунок 7 – Входные относительные спектральные контрасты

Входной относительный спектральный контраст зеленой миры наименьший в области максимума спектральной чувствительности цифрового фотоаппарата. Минимальная разница между значениями входного спектрального контраста зеленой и других мир составляет примерно 4 раза. Максимум спектральной чувствительности цифрового фотоаппарата находится на длине волны $\lambda = 550$ нм, то есть в зеленой области спектра. Разница между максимальным и минимальным значением спектральной чувствительности в видимом диапазоне спектра составляет примерно 1,5 раза.

Существенное отличие оценок разрешающей способности, полученных по ахроматической и зеленой мирам, объясняется разницей входных спектральных контрастов тест-объектов и недостаточным увеличением спектральной чувствительности цифрового фотоаппарата в зеленой области спектра.

По результатам эксперимента была выявлена зависимость разрешающей способности от фокусного расстояния фотоаппарата, показанная на рисунке 8.

Разрешающая способность цифрового фотоаппарата уменьшается с увеличением фокусного расстояния объектива. Это явление объясняется, с одной стороны, дифракционной теорией разрешения [1, 6], а с другой – увеличением шумов приемника излучения, как следствия увеличения коэффициента усиления детекторной схемы при снижении освещенности датчика, которое имеет место при увеличении фокусного расстояния объектива при неизменном диаметре входного отверстия.

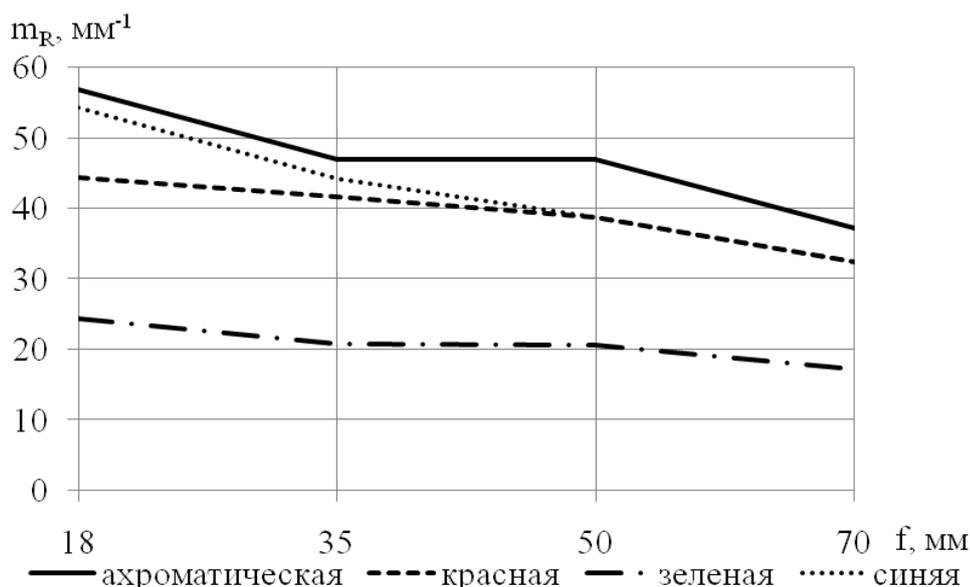


Рисунок 8 – Зависимость m_R от фокусного расстояния

Второй этап – применение ахроматических штриховых тест-объектов, различно ориентированных относительно стороны приемника оптического излучения.

На этом этапе проводится исследование влияния регулярности структуры ПОИ на значение оценки разрешающей способности.

Для проведения этого лабораторного эксперимента на полигоне были размещены штриховая традиционная мира, штриховые полупериодные миры двух типов и эти же тест-объекты, ориентированные под углом 45° к стороне приемника оптического излучения.

На рисунке 9 показан цифровой снимок полигона второго этапа лабораторного эксперимента.

Статистические характеристики результатов эксперимента представлены в таблице 4.

Доверительные интервалы оценок математического ожидания разрешающей способности пересекаются в 76,7 % случаев, то есть истинные значения разрешающей способности, полученные по различным ахроматическим штриховым мирам, могут совпадать.

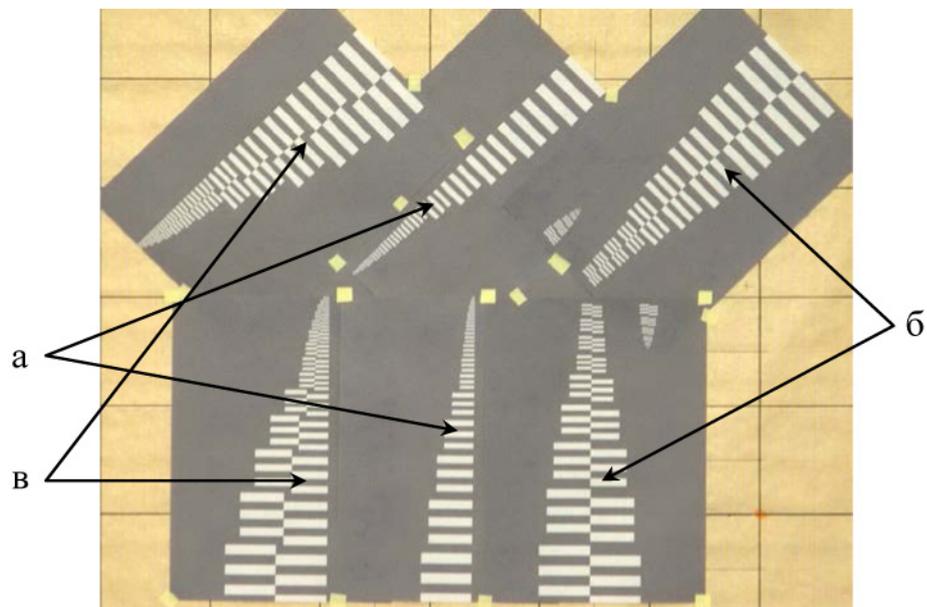


Рисунок 9 – Цифровой снимок полигона второго этапа:

а – штриховая традиционная мира, б – штриховая полупериодная мира 1-го типа, в – штриховая полупериодная мира 2-го типа

Таблица 4

Статистические характеристики результатов эксперимента

Тип мира	f , мм	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε
традиционная	18	40,68	3,04	2,29
традиционная 45°	18	48,48	4,77	3,60
полупериодная № 1	18	42,08	4,76	3,59
полупериодная № 1 45°	18	47,13	4,86	3,66
полупериодная № 2	18	46,83	4,43	3,34
полупериодная № 2 45°	18	54,61	4,10	3,09
традиционная	35	44,24	2,72	2,05
традиционная 45°	35	47,09	2,34	1,77
полупериодная № 1	35	46,42	2,51	1,90
полупериодная № 1 45°	35	48,20	2,24	1,69
полупериодная № 2	35	49,28	3,23	2,43
полупериодная № 2 45°	35	51,69	2,65	1,99
традиционная	50	39,98	4,29	3,24
традиционная 45°	50	43,94	5,30	3,99
полупериодная № 1	50	41,42	4,77	3,60
полупериодная № 1 45°	50	45,95	5,90	4,45

полупериодная № 2	50	45,15	4,28	3,23
полупериодная № 2 45°	50	48,84	5,06	3,82
традиционная	70	39,51	4,50	3,39
традиционная 45°	70	40,22	2,52	1,90
полупериодная № 1	70	39,85	4,30	3,24
полупериодная № 1 45°	70	41,56	3,29	2,48
полупериодная № 2	70	42,04	4,34	3,27
полупериодная № 2 45°	70	41,97	4,29	3,23

Проведенный сравнительный анализ значений оценок разрешающей способности полученных по традиционным мирам и мирам ориентированным под 45° к стороне ПОИ показал, что применение последних позволяет повысить оценку разрешения цифровых фотоаппаратов на величину не превышающую 10 %.

Явление увеличения значения оценок разрешающей способности полученных по мирам, ориентированных под углом 45° к стороне приемника оптического излучения, можно объяснить увеличением периода, таким образом расположенных тест-объектов в элементах изображения. Проекций периодов разноориентированных штриховых мир на матричный ПОИ показаны на рисунке 10.

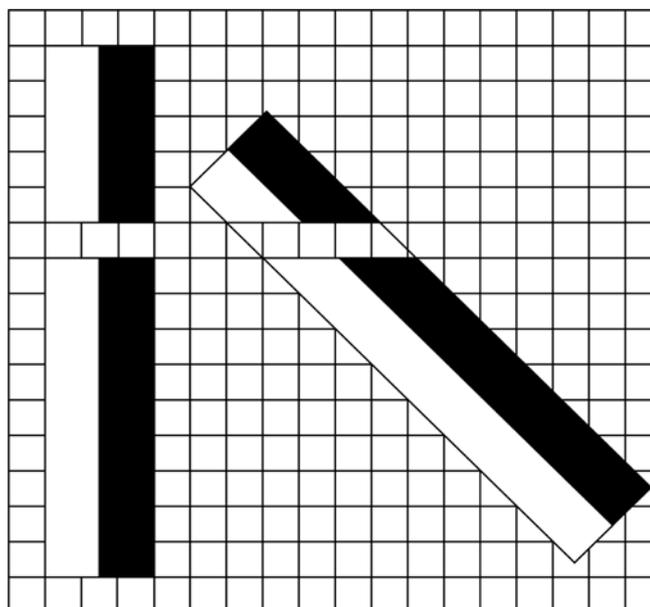


Рисунок 10 – Проекция периода мира на матричный ПОИ

Увеличение разрешающей способности в полупериодных мирах объясняется увеличением длины штриха, площади группы штрихов и видом пространственного сигнала таких тест-объектов.

В 45 % случаев доверительные интервалы оценок математического ожидания разрешающей способности, полученных по полупериодной мире второго типа, ориентированной под углом 45° к стороне приемника оптического излучения, не пересекаются. То есть истинное значение разрешающей способности, полученное по полупериодной мире второго типа, ориентированной под углом 45° к стороне ПОИ, может отличаться от истинного значения разрешающей способности, полученного по традиционной мире.

Третий этап – применение тест-объекта «оптический sinc».

Рассмотренные выше штриховые миры являются «дискретными» тест-объектами и имеют определенную угловую ориентацию относительно стороны приемника оптического излучения. Поэтому для повышения точности оценки разрешающей способности цифровых аэрофотосъемочных систем необходимо создать тест-объект с непрерывным изменением пространственной частоты [7] и инвариантный к угловой ориентации относительно стороны ПОИ.

Функция вида:

$$y(x) = \frac{\sin(x)}{x} = \text{sinc}(x)$$

имеет равномерный ограниченный спектр Фурье.

Фурье преобразование функции $\text{sinc}(x)$ описывается выражением:

$$F(y(x)) = F(\omega) = -\pi(\Phi(\omega - 1) - \Phi(\omega + 1)),$$

где $\Phi(\omega)$ – единичная функция.

На рисунке 11 показан график функции $\text{sinc}(x)$ и спектр Фурье $F(\omega)$ функции $\text{sinc}(x)$.

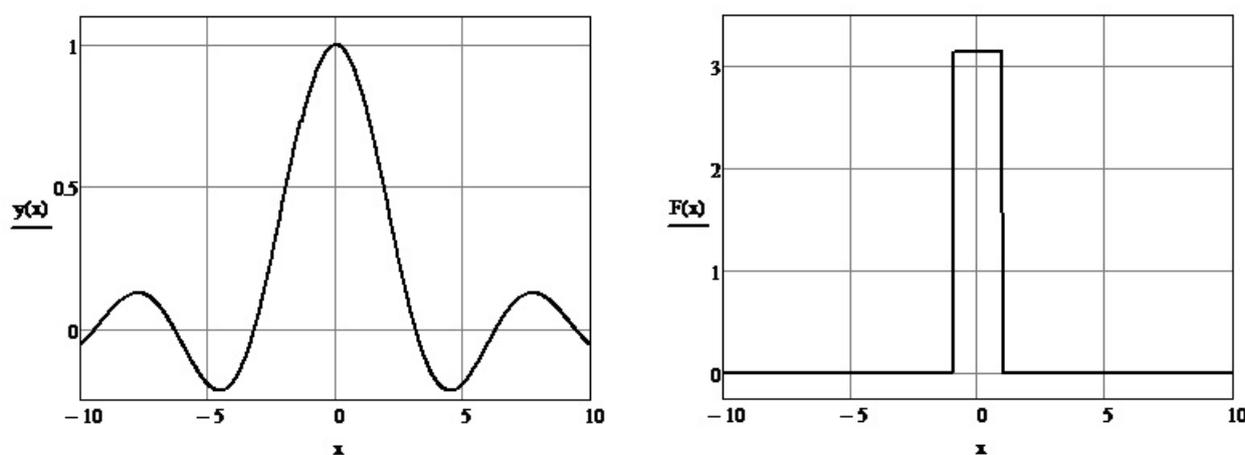


Рисунок 11 – График функции $\text{sinc}(x)$ и спектр Фурье функции $\text{sinc}(x)$

В качестве основы для создания тест-объекта с равномерным ограниченным спектром используем функцию описанную выражением:

$$\frac{\sin(ax)}{ax}$$

Найдем Фурье преобразование функции $\text{sinc}(ax)$:

$$\begin{aligned} F(\Omega) = F(\text{sinc}(ax)) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(ax)}{ax} \exp(-j\Omega x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(ax)}{ax} \cos(\Omega x) dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(ax)}{ax} \cos\left(\frac{\Omega}{a} ax\right) \frac{1}{a} d(ax) = \{t = ax\} = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(t) \cos\left(\frac{\Omega}{a} t\right)}{t} dt = \\ &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\sin\left[\left(1 - \frac{\Omega}{a}\right)t\right] + \sin\left[\left(1 + \frac{\Omega}{a}\right)t\right] \right) \right] dt = \\ &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{\sin\left[\left(1 - \frac{\Omega}{a}\right)t\right]}{t} dt + \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{\sin\left[\left(1 + \frac{\Omega}{a}\right)t\right]}{t} dt. \end{aligned}$$

На рисунке 12 показаны графики функции $\text{sinc}(ax)$ и спектры Фурье функции $\text{sinc}(ax)$ при различных значениях a .

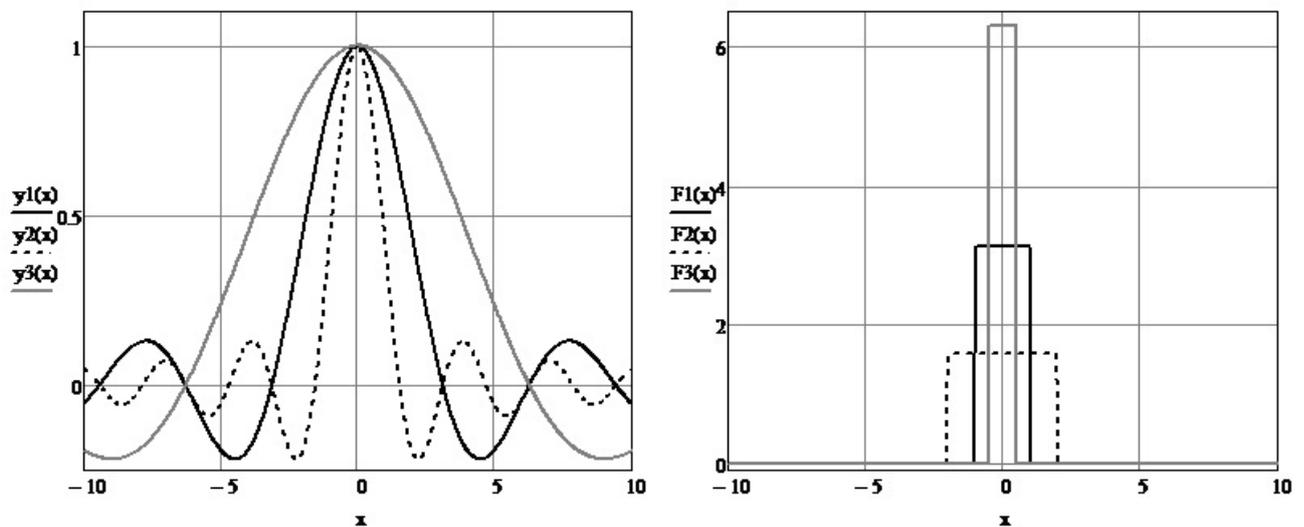
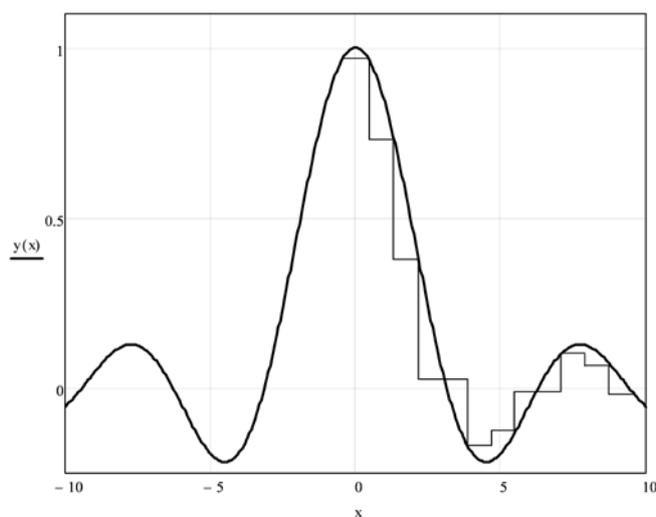


Рисунок 12 – Функции $\text{sinc}(ax)$ и спектры Фурье при $a_3 < a_1 < a_2$

Как видно из рисунка 12 при увеличении значения a ($a > 1$) график функции $\text{sinc}(ax)$ сжимается, а спектр Фурье функции $\text{sinc}(ax)$ уменьшает свою амплитуду и расширяется.

Для создания тест-объекта «оптический sinc» был построен график функции $\frac{10 \sin(x)}{x}$ в сантиметровом масштабе, затем с шагом 0,5 см были нанесены вертикальные сечения и горизонтальные сечения произвольного шага. В результате чего были получены 17 уровней, наибольшему уровню было присвоено значение яркости 255, наименьшему – 0, остальные уровни были рассчитаны в процентном отношении и каждому присвоено соответствующее значение яркости. Данный процесс иллюстрирует рисунок 13 а. Затем был изготовлен тест-объект «оптический sinc», показанный на рисунке 13 б.



а) определение яркостей тест-объекта «оптический sinc»



б) тест-объект «оптический sinc»

Рисунок 13 – Тест-объект «оптический sinc»

На рисунке 14 показан цифровой снимок тест-объекта «оптический sinc».

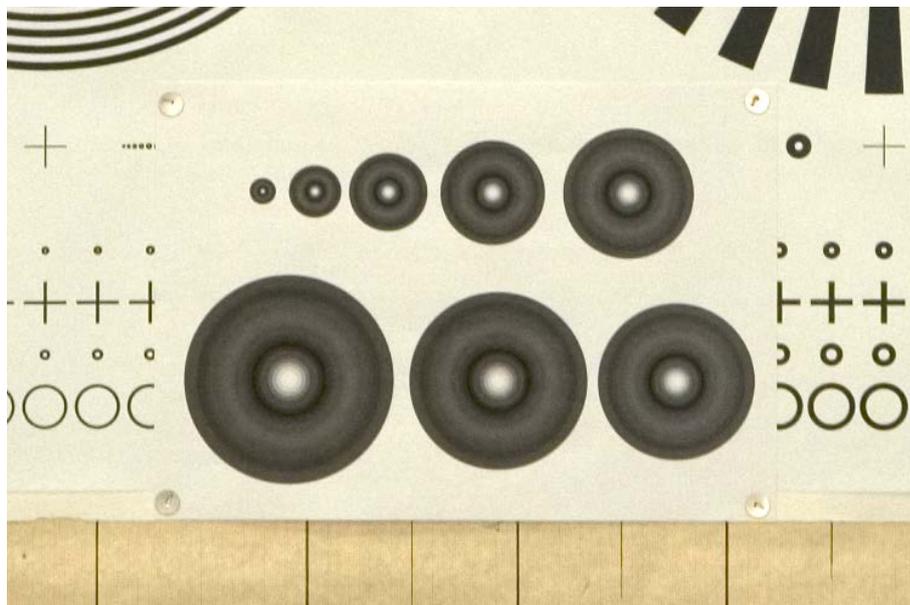


Рисунок 14 – Цифровой снимок тест-объекта «оптический sinc»

Анализ полученных изображений тест-объекта «оптический sinc» показал сохранение формы сигнала в изображении даже за пределами разрешения в плоскости предметов (аналог разрешения на местности), близость положения точки пересечения пороговой модуляционной характеристики (ПМХ) и модуля спектра Фурье к разрешающей способности цифрового фотоаппарата.

На рисунке 15 показаны нормированная яркость сечения цифрового изображения тест-объекта «оптический sinc» и модуль спектра Фурье.

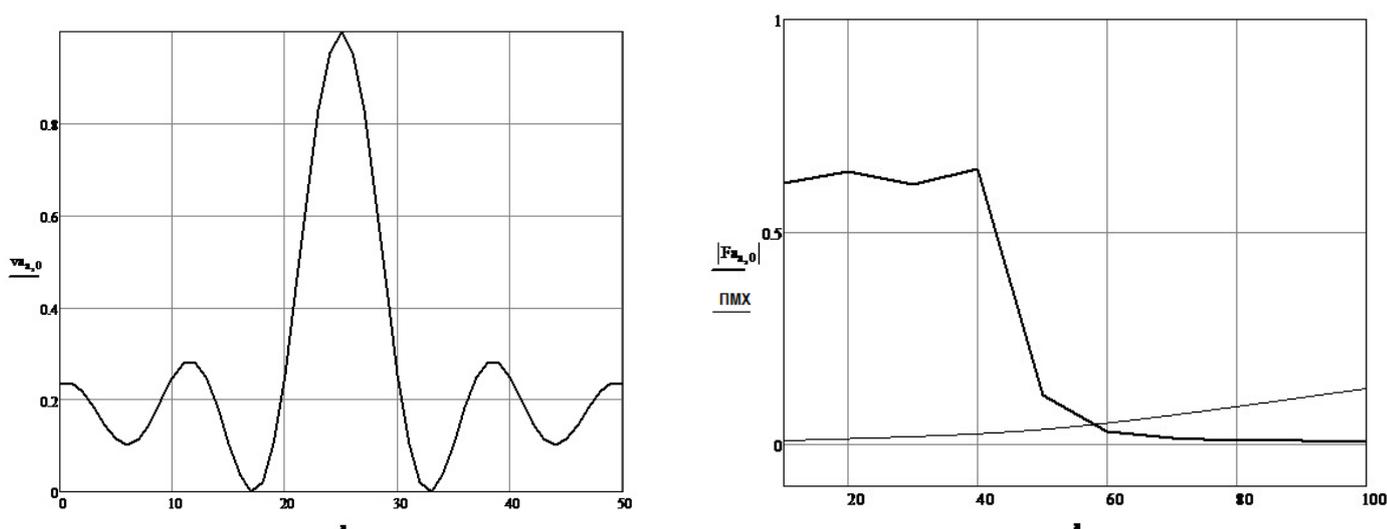


Рисунок 15 – Нормированная яркость и модуль спектра Фурье

Достоинствами тест-объекта «оптический sinc» являются равномерный ограниченный спектр изображения, инвариантность к угловой ориентации относительно стороны приемника оптического излучения. Недостатком тест-объекта «оптический sinc» является

небольшая мощность сигнала, что затрудняет его использование в летных условиях.

Четвертый этап – применение кольцевых и радиальных тест-объектов.

Рассмотренный выше тест-объект «оптический sinc» имеет недостаток, затрудняющий его использование в летных условиях. Поэтому далее в качестве тест-объектов с непрерывным изменением пространственной частоты и инвариантных к угловой ориентации относительно стороны ПОИ рассматриваются радиальная, кольцевые и кольцевая концентрическая миры.

Для проведения четвертого этапа лабораторного эксперимента был создан полигон, цифровой снимок которого показан на рисунке 16.

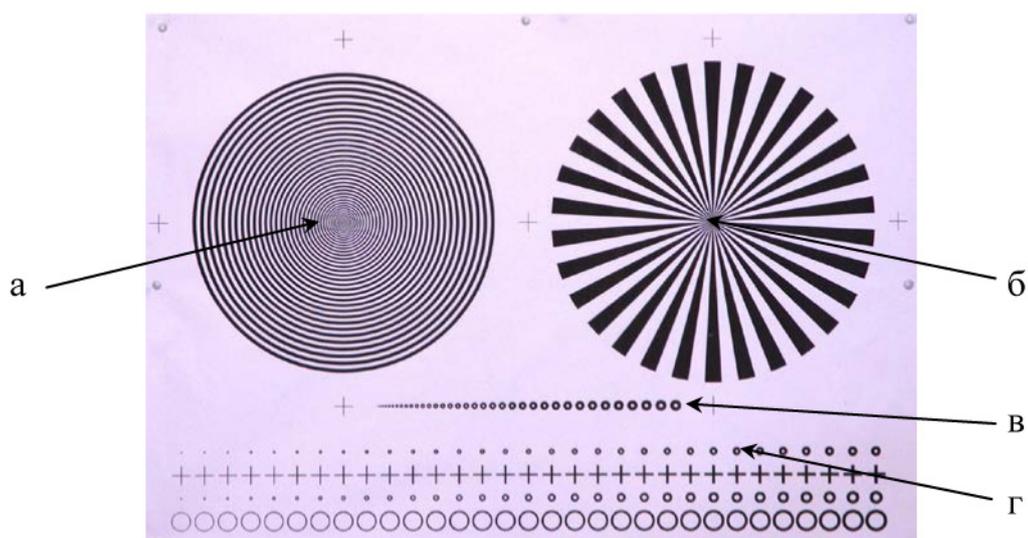


Рисунок 16 – Цифровой снимок полигона четвертого этапа:

а – кольцевая концентрическая мира, б – радиальная мира, в – кольцевая мира 1, г – кольцевая мира 2

Статистические характеристики результатов эксперимента представлены в таблице 5.

Таблица 5

Статистические характеристики результатов эксперимента

f, мм	кольцевая концентрическая мира			радиальная мира			кольцевая мира 1			кольцевая мира 2		
	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε	\hat{m}_R	$\hat{\sigma}_R$	ε
18	56,45	1,15	0,87	55,4	1,16	0,85	49,53	3,98	3,00	48,78	3,57	2,69
35	51,29	3,75	2,82	50,8	3,67	2,83	37,31	2,16	1,63	40,57	3,05	2,30
50	58,36	3,56	2,69	50,8	3,62	2,71	40,26	3,26	2,45	38,36	2,84	2,14
70	55,57	4,48	3,38	43,5	4,52	3,47	37,49	3,44	2,60	35,07	1,36	1,02

Доверительные интервалы оценок математического ожидания разрешающей способности пересекаются, то есть значения разрешающей способности, полученные по кольцевым мирам, могут совпадать.

Разрешающая способность, определенная по радиальной и кольцевой концентрической мирам, выше на 28,9 %, то есть на $11,6 \text{ мм}^{-1}$, чем разрешающая способность, определенная по кольцевым мирам. Это объясняется тем, что, с одной стороны, кольцевые миры представляют собой аналог штриховых мир, то есть имеют дискретный характер изменения пространственной частоты, а с другой, пространственный сигнал от отдельно взятого кольца кольцевой миры имеет в своем составе кроме основной пространственной частоты, соответствующей ширине кольца, более высокие пространственные частоты. Радиальная же мира имеет непрерывный характер изменения пространственной частоты и по этой причине более гибко позволяет оценивать разрешающую способность цифровых ОЭС МЗП.

Выводы по результатам лабораторного эксперимента

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что штриховые миры могут быть использованы для оценки разрешающей способности цифровых ОЭС МЗП, так как они дают близкие результаты по оценке разрешающей способности к результатам, полученным по радиальным и кольцевым мирам. Для подтверждения адекватности полученных результатов ахроматические радиальные и кольцевые миры использовались в связи с тем, что:

- кольцевая мира – это тест-объект, который хотя и имеет дискретный характер изменения пространственной частоты, однако является инвариантным к угловой ориентации относительно стороны приемника оптического излучения, что снимает необходимость точной угловой ориентации направления захода на тест-объект и позволяет получить оценку разрешающей способности по всем направлениям одновременно;
- радиальная мира имеет непрерывный характер изменения пространственной частоты и так же как кольцевая является инвариантной к угловой ориентации относительно стороны приемника оптического излучения.

Описание и результаты летного эксперимента

В ходе демонстрационных полетов на самолете Ан-30Б, оборудованном цифровой оптико-электронной системой, была выполнена аэрофотосъемка района геополгона с четырех высот: 2000, 3000, 5500 и 7200 м.

Характеристики цифровой оптико-электронной системы:

- фокусное расстояние – $f = 180 \times 10^{-3}$ м;
- размер элемента приемника оптического излучения – $a = 3,275 \times 10^{-6}$ м;
- система компенсации сдвига изображения – отсутствует.

На геополигоне были размещены два тест-объекта:

1. Испытательная мира (мира ДОН), показанная на рисунке 17.
2. Тест-объект цифровой оптический полупериод центральной группы 0,05 метра высокого контраста (мира ТО-ЦО-0,05м-ВК).

Тест-объект ТО-ЦО-0,05м-ВК предназначен для получения оценки разрешающей способности цифровых ОЭС в летных условиях и состоит из кольцевой концентрической миры, штриховых и кольцевых мир, ориентированных под углами 0° , 45° и 90° к направлению полета.

Внешний вид тест-объекта ТО-ЦО-0,05м-ВК показан на рисунке 18.

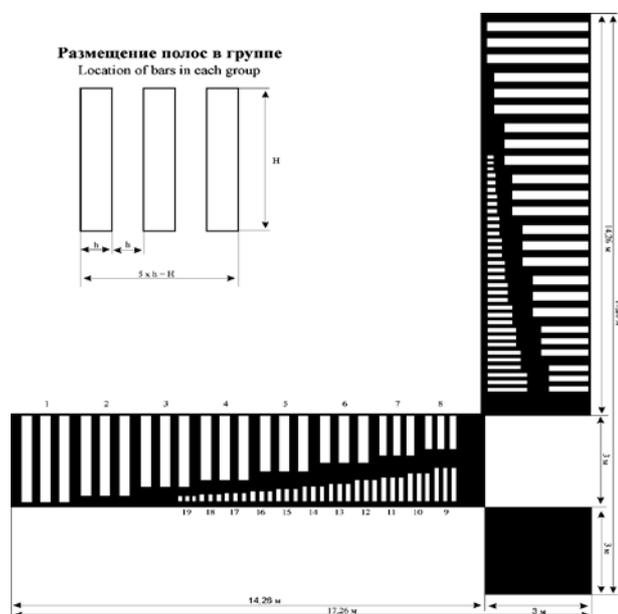


Рисунок 17 – Внешний вид испытательной миры

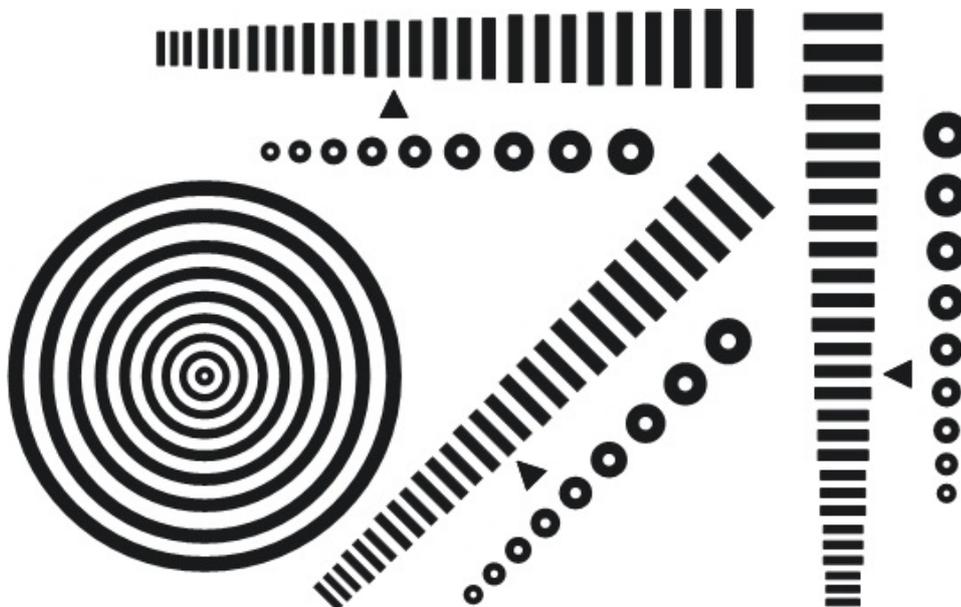


Рисунок 18 – Внешний вид тест-объекта ТО-ЦО-0,05м-ВК

Характеристики тест-объекта ТО-ЦО-0,05м-ВК:

- модуляционный контраст – 0,58...0,93;
- рабочий диапазон освещенности – 40000...110000 люкс;
- равномерная спектральная характеристика в диапазоне – 400...800 нм.

Полученные в результате аэрофотосъемки изображения подвергались визуальному анализу. В ходе визуального анализа определялся номер группы штрихов (для штриховой миры) и номер кольца (для кольцевой концентрической и кольцевой мир), которые различаются еще отдельно. По известной пространственной частоте штриха (кольца) рассчитывалась разрешающая способность цифровой ОЭС по каждому изображению.

Результаты летного эксперимента были подвергнуты статистической обработке: определены оценки математического ожидания, среднеквадратического отклонения и интервальные оценки разрешающей способности [2, 5]. Доверительные интервалы для математического ожидания разрешающей способности оценивались с использованием распределения Стьюдента по уровню значимости $\alpha = 0,05$.

Статистические характеристики результатов летного эксперимента представлены в таблице 6.

Статистические характеристики результатов летного эксперимента

статистические характеристики оценки разрешающей способности, мм ⁻¹	мира ДОН			мира ТО-ЦО-0,05м-ВК				
	вдоль НП	поперек НП	45° НП	вдоль НП	поперек НП	45° НП	концентрическая кольцевая	кольцевая
\hat{m}_R	87,81	103,51	92,04	106,36	112,43	124,08	116,64	92,3
$\hat{\sigma}_R$	10,98	11,05	10,4	4,51	8,2	8,88	7,64	5,9
$(\hat{m}_R - \varepsilon; \hat{m}_R + \varepsilon)$	83,9...91,71	96,9...110,13	87,16...96,91	100,1...112,62	105,75...119,12	111,75...136,41	110,88...122,4	84,11...100,49

Оценки разрешающей способности цифровой оптико-электронной системы, полученные по результатам летного эксперимента, близки к прогнозируемой разрешающей способности $R_{прог.} = 117,44 \text{ мм}^{-1}$ [2]. Наиболее близкой является оценка разрешающей способности цифровой ОЭС, полученная по кольцевой концентрической мире.

Разница оценок разрешающей способности, полученных по мирам ДОН и ТО-ЦО-0,05м-ВК, связана с разницей контрастов указанных тест-объектов.

Оценка разрешающей способности, полученная по штриховой мире, ориентированной под углом 45° к направлению полета, близка к среднему значению оценок, полученных по мирам, ориентированным вдоль и поперек направления полета. Это объясняется влиянием продольного сдвига изображения, обусловленного движением летательного аппарата, при отсутствии системы компенсации сдвига изображения.

Цифровой аэрофотоснимок с двумя увеличенными фрагментами показан на рисунке 19.



Рисунок 19 – Цифровой аэрофотоснимок

Выводы по результатам летного эксперимента

Результаты летного эксперимента подтвердили возможность использования в качестве инструмента измерения разрешающей способности цифровых ОЭС ахроматических штриховой и кольцевой концентрической миры заданного контраста с равномерной спектральной характеристикой.

Общие выводы по работе

Оценка характеристик средств мониторинга земной поверхности необходима на всех этапах их жизненного цикла. Точность оценки характеристик важна в независимости от сферы применения средств МЗП будь то международная, военная или народнохозяйственная. Например, в настоящее время идет активная подготовка к практическому применению цифровой аппаратуры наблюдения в рамках международного Договора по открытому небу. Заданная точность оценки пространственно-частотных характеристик аппаратуры наблюдения обеспечивает невозможность несанкционированного сбора дополнительной информации.

Цифровые оптико-электронные системы имеют ряд особенностей, которые должны быть учтены в процессе получения оценки их разрешающей способности, для этого необходим соответствующий инструмент измерения. Результаты работы показали возможность использования для оценки разрешающей способности трех типов тест-объектов: ахроматических штриховой, радиальной и кольцевой концентрической при заданном контрасте с равномерной спектральной характеристикой в видимом диапазоне. Оценки разрешающей способности цифровой ОЭС, полученные с их помощью, достаточно близки. Относительная разница оценок разрешающей способности, полученных по указанным тест-объектам, находится в диапазоне от 2 % до 7 %. При использовании штриховых тест-объектов необходимо учитывать ориентацию штрихов относительно регулярной структуры приемника оптического излучения. При использовании кольцевых концентрических и радиальных тест-объектов необходимо тщательно проработать правила принятия решения о разрешении.

Результаты работы были использованы при выработке позиции Российской Федерации на переговорах неофициальной рабочей группы по аппаратуре наблюдения Консультативной комиссии по открытому небу (г. Вена, Австрия).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 11-08-00850-а.

Литература

1. Бутиков Е.И. Оптика – С-Пб.: Лань, 2012. - 608 с.
 2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей – М.: Academia, 2003. - 576 с.
 3. Веселов Ю.Г. Прогнозирование разрешающей способности цифровых аэрофотосъемочных систем. / С.П. Гулевич, А.А. Данилин, И.В. Карпиков, В.В. Тихонычев // Проблемы безопасности полетов. –2009. – № 2 – С.21–25.
 4. Метрология, стандартизация и сертификация – Под ред. Зиновьева А.В. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2007.
 5. Музалев Г.А. Основы математической статистики – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2005.
 6. Прикладная оптика – Под ред. Заказнова Н.П. – С-Пб.: Лань, 2009. - 320 с.
- Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: пер. с нем. – М.: Мир, 1978.- 670 с.

Selection of a test-object for resolution estimation of digital optic-electronic systems monitoring the Earth surface

77-30569/364381

04, April 2012

Veselov Yu., G., Danilin A.A., Tikhonychev V.V.

Bauman Moscow State Technical University

vesel_foto@mail.ru

ksandrdan@rambler.ru

v_tikhonychev@mail.ru

This paper covers selection of resolution tools (test-objects) for visible digital optic-electronic systems. The measurement accuracy of physical quantity depends on the measuring tool type, in other words precision of measurements to the true value of the measured quantity. The given task is solved by a physical experiment method. The experiment was conducted in laboratory and flight conditions. The experiment results were statistically analyzed.

Publications with keywords: [digital optic-electronic systems](#), [digital photo camera](#), [test-object](#), [resolution performance](#), [pattern](#)

Publications with words: [digital optic-electronic systems](#), [digital photo camera](#), [test-object](#), [resolution performance](#), [pattern](#)

References

1. Butikov E.I. *Optika* [Optics]. SPb., Lan', 2012. 608 p.
2. Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability theory]. Moscow, Academia, 2003. 576 p.
3. Veselov Iu.G., Gulevich S.P., Danilin A.A., Karpikov I.V., Tikhonychev V.V. Prognozirovanie razreshaiushchei sposobnosti tsifrovyykh aerofotos"emochnykh system [Prediction of resolving power of digital aerial systems]. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2009, no. 2, pp. 21–25.
4. Zinov'ev A.V., ed. *Metrologiia, standartizatsiia i sertifikatsiia* [Metrology, Standardization and Certification]. Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo Publ., 2007.
5. Muzalev G.A. *Osnovy matematicheskoi statistiki* [Fundamentals of Mathematical Statistics]. Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo Publ., 2005.
6. Zakaznov N.P., ed. *Prikladnaia optika* [Applied Optics]. SPb., Lan', 2009. 320 p.
7. Freezer H. *Photographic recording of information*. Springer-Verlag, 1978. (in German). (Russ. Ed.: Frizer Kh. *Fotograficheskaiia registratsiia informatsii*. Moscow, Mir, 1978. 670 p.).