

Контроль качества изображения оптических систем на приборах серии ImageMaster производства Trioptics

Контроль качества изображения оптических систем является завершающим этапом производства многих оптических изделий. На этом этапе контролируемому изделию дают качественную оценку получаемого изображения, анализируя тем самым в совокупности точность изготовления ее отдельных элементов и качество их сборки. Наиболее распространенным критерием оценки изображения при таком анализе является ЧКХ – частотно-контрастная характеристика (или КПМ – коэффициент передачи модуляции), для построения которой Trioptics предлагает решение – приборы серии ImageMaster.

Что такое ЧКХ?

Частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) называют зависимость контраста изображения, значение которого меняется от 0 до 1 (или от 0 до 100%) от пространственной частоты, выраженной в линиях на единицу длины (мм).

В основе принципа построения графиков ЧКХ лежит свойство оптической системы понижать контраст изображения с увеличением пространственной частоты (или, другими словами, плотности) изображаемого объекта. Наиболее наглядно это видно в случае, если в качестве объекта выступает набор штрихов с различной частотой (см. рис. 1).



Рис. 1. Уменьшение контраста изображения после прохождения через оптическую систему.

График ЧКХ представляет собой зависимость амплитуды контраста $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$ от пространственной частоты (плотности штрихов на единицу длины), соответствующей каждой из этих амплитуд (рис.2).

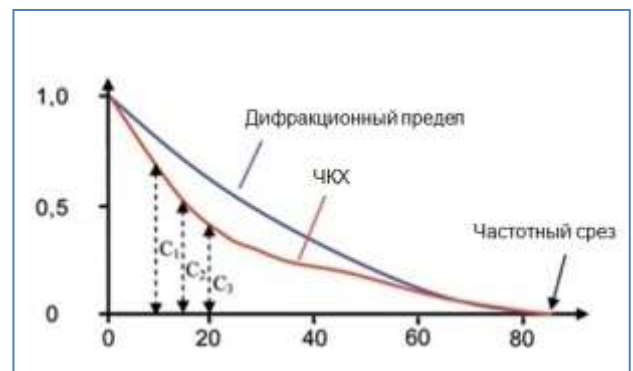


Рис. 2. Графики ЧКХ - расчетный (синяя кривая) и построенный при измерении (красная прямая)

Классическим способом контроля качества изображения является его визуальный контроль при помощи набора мир с фиксированным расстоянием между штрихам, что в силу субъективных причин (острота зрения, усталость оператора) не является достаточно точным методом. Современные приборы контроля ЧКХ позволяют отказаться от набора мир и использовать один тест-объект (одну щель) для построения ЧКХ для широкого диапазона пространственных частот путем Фурье-преобразования функции рассеяния линии (рис. 3).



Рис.3. Функция рассеяния линии, на основе которой строится график ЧКХ.

Модификации приборов и их конструктивные особенности.

Для построения графиков ЧКХ в приборах серии **ImageMaster** используются следующие узлы и комплектующие:

- зеркальный или линзовый коллиматор, формирующий световой пучок и имитирующий положение тест-объекта в бесконечности.
- источник света, работающий в одном или нескольких спектральных диапазонах;
- набор тест-объектов (сеток), расположенных в фокальной плоскости коллиматора и фильтры;
- дугообразная направляющая для вращения приемной части, обеспечивающей измерение параметров вне оси;
- объективодержатель для установки и центрировки объектива перед измерением, а также для вращения объектива во время измерения;
- камера для регистрации изображения тест-объекта, прошедшего через контролируемый объектив.
- направляющие, осуществляющие автоматизированное перемещение камеры по фокусу и по полю; направляющие оснащаются высокоточными линейными шкалами, регистрирующими положения объектива и камеры во время измерения.

Далее для упрощения изложения будем полагать, что контролируемой оптической системой является объектив (например, для фото- или видеосъемки). При измерении такого объектива необходима конфигурация прибора для измерения оптических систем, работающих из бесконечности. В зависимости от типоразмера контролируемого объектива **Trioptics** предлагает две модификации приборов серии **ImageMaster** – **HR** и **Universal**.

ImageMaster HR имеет вертикальное исполнение и оснащается линзовым коллиматором (с фокусным расстоянием 300 мм) с источниками света, работающими в различных спектральных диапазонах. Объектив устанавливается на вращающемся вокруг оптической оси держателе, а измерение по полю осуществляется за счет вращения автоколлиматора вдоль дугообразной направляющей. Камера, регистрирующая изображение, расположена в основании прибора и надежно защищена кожухом от солнечных лучей и воздушных потоков. Эта модель отличается компактным расположением узлов, обеспечивает устойчивое положение объектива при измерении за счет вертикальной установки, однако подходит для контроля сравнительно небольших оптических систем (апертура не более 45 мм, фокусное расстояние не более 150 мм, масса – не более 2 кг), например, объективов фотоаппаратов.



Рис.4. Прибор серии **ImageMaster HR**.

Более универсальным с точки зрения типоразмеров контролируемых изделий является серия приборов **ImageMaster Universal**. Эти приборы представляют собой горизонтальную установку, смонтированную на едином основании (оптическом столе) с пневматической виброизоляцией для исключения воздействия вибраций на результаты измерений.

Для формирования изображения тест-объекта, находящегося в бесконечности, установка оснащается зеркальными коллиматорами с фокусным расстоянием от 600 до 3000 мм и апертурой от 100 до 300 мм, использующим ломанную оптическую схему. Для измерений объективов с малыми фокусными расстояниями (от 10 мм) станция может быть укомплектована дополнительным зеркальным коллиматорами, фокусное расстояние которого значительно (до 10 раз) отличается от фокусного расстояния основного коллиматора.

Качество изготовления поверхности зеркал – не хуже $\lambda/10$.

Для измерений на определенной длине волны отдельных оптических параметров объективов с различным фокусным расстоянием установка комплектуется набором интерференционных и широкополосных фильтров, а также набором вертикальных, горизонтальных и парных сеток различной толщины. Коллиматор, входящий в состав установки, оснащается посадочным гнездом для их установки и смены в ручном или ЧПУ режиме.

Также конструкция коллиматора обеспечивает быструю установку блока подсветки тест-объектов, включающего источник света и конденсор для измерений в одном из спектральных диапазонов – от УФ (300 нм) до дальнего ИК (12 мкм). Смена блоков занимает одну-две минуты и не требует трудоемкой настройки перед измерениями.



Рис.5. Прибор серии ImageMaster Universal.

Узел прибора, отвечающий за регистрацию изображения, состоит из следующих элементов:

- держатель объективов с возможностью поворота измеряемого объектива относительно его оптической оси. Держатель оснащается винтами микроподачи для регулировки положения объектива по высоте, обеспечивая точную установку входного зрачка объектива относительно оптической оси коллиматора и точной регулировки смещения объектива в двух плоскостях для устранения смещения объектива при его вращении относительно оптической оси. Плавность вращения измеряемого объектива обеспечивается за счет высокоточного подшипника вращения.



*Рис.6. Объективодержатель, используемый на установках серии **ImageMaster Universal**.*

- дугообразная направляющая, обеспечивающая изменение угла измеряемого объектива относительно падающего светового потока зеркального коллиматора.

- платформа для установки детекторов (приемников сигнала), работающих в различных спектральных диапазонах. Платформа должна иметь возможность грубого ручного и точного автоматизированного перемещения приемников вдоль оси «Х» (оптической оси зеркального коллиматора), а также точного автоматизированного перемещения вдоль оси «У» (по полю). Для регистрации сигнала в одном из спектральных диапазонов платформа оснащается посадочным гнездом для быстрой установки приемников.

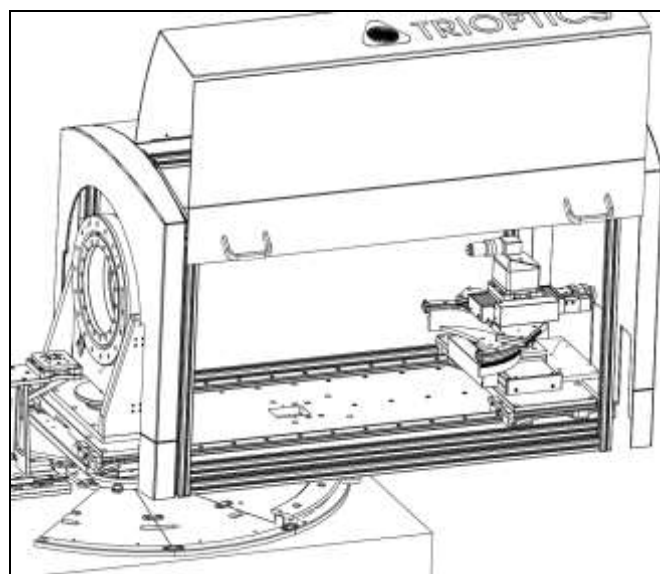


Рис.7. Схема, поясняющая устройство приемной части. Внутри защитного кожуха за объективодержателем расположена камера на подвижной платформе (также см. рис. 6).

- защитный кожух, защищающей область установки объектива и приемников от воздействия световых и воздушных потоков.

В зависимости от типа контролируемой оптической системы **Trioptics** предлагает различные дополнения к базовому исполнению станции. Так, например, для контроля конечных оптических систем (предмет и его изображение находятся на конечном расстоянии) источник света устанавливается на дополнительную направляющую, имитирующую положение перекрестия на конечном расстоянии.



Рис.7. Стойка с источником света для контроля оптических систем, работающих с конечного расстояния.

А для контроля афокальных систем (предмет и его изображение находятся на бесконечности) камера устанавливается на дополнительную дугообразную направляющую, позволяющую

изменять ее угол относительно выходного зрачка телескопа. Один и тот же прибор может быть оснащен приспособлениями для контроля систем различного типа, в том числе и в рамках модернизации после того, как он введен в эксплуатацию на предприятии.

Наряду с аппаратной частью станции **ImageMaster** оснащаются многофункциональным ПО, управляющим процессом измерения и регистрирующим его результаты. Помимо ЧКХ прибор позволяет контролировать различные характеристики оптических систем – фокусное расстояние, монохроматические (дисторсия, астигматизм) и хроматические (продольные, поперечные) aberrации, рабочий отрезок и задневершинное рабочее расстояние. В следующем номере журнала будут рассмотрены методики измерения данных параметров на приборах серии **ImageMaster** и показаны примеры измерительных протоколов.

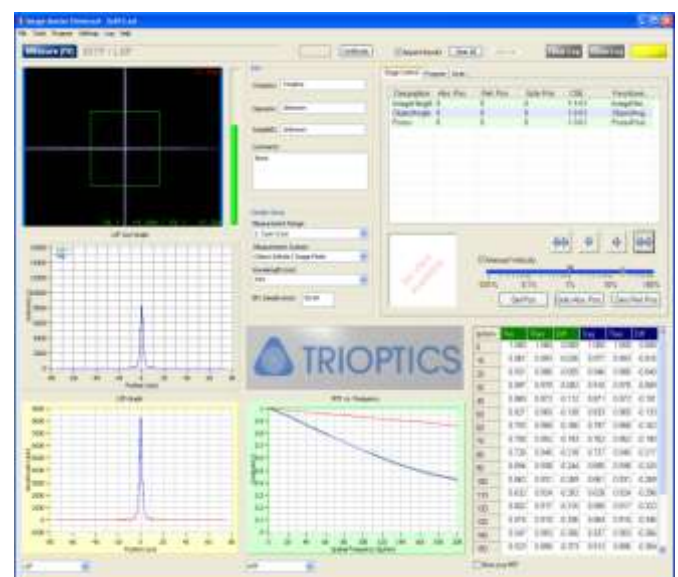


Рис.8. Главное окно программного обеспечения MTF -LAB.



Особенности контроля отдельных оптических параметров на приборах серии ImageMaster производства Trioptics. Возможности программного обеспечения MTF LAB

В предыдущей статье были рассмотрены станции серии ImageMaster, предназначенные для построения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) – зависимости контраста изображения от пространственной частоты. Помимо ЧКХ эти станции позволяют контролировать другие оптические параметры, характеризующие качество изображения, воспроизводимого оптическими системами.

Частотно-контрастная характеристика

Это основной параметр, отображаемый программой. Перед измерением ЧКХ целесообразно выполнить «сканирование» изображения вдоль оптической оси объектива для установки камеры в плоскость наилучшего изображения, что возможно благодаря креплению камеры на ЧПУ направляющей с высокоточной шкалой отсчета. Это положение соответствует вершине графика на рис. 1 - зависимость контраста (%) от положения по фокусу (мм). При этом в окне, передающем изображение с ПЗС матрицы, можно наблюдать (наиболее) резкое изображение перекрестия (рис. 1).

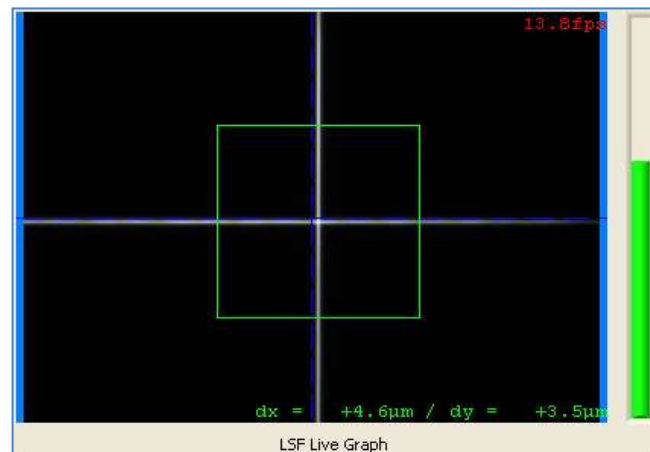
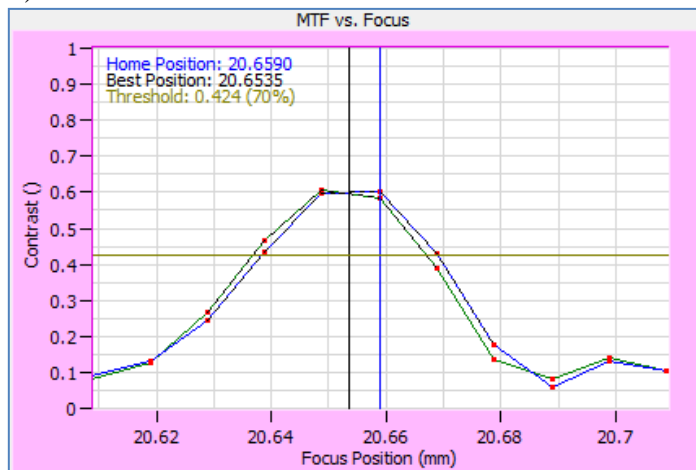
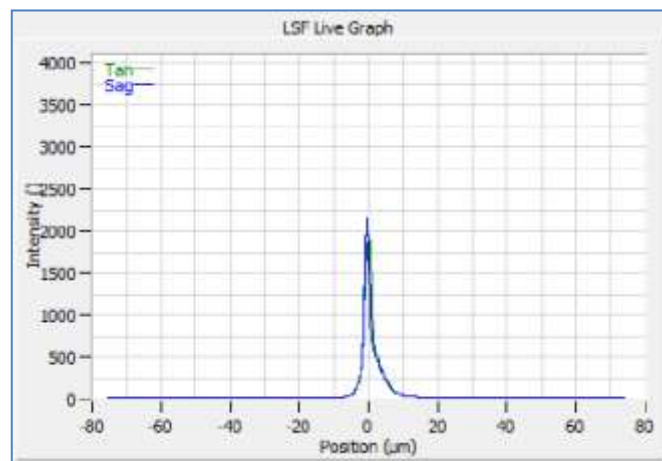
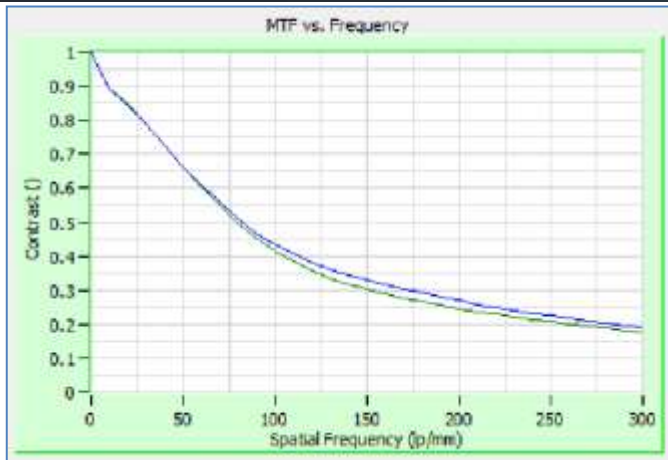


Рис. 1. Определение плоскости наилучшего изображения (сверху) и изображение перекрестия в окне программы.

После того как плоскость наилучшего изображения определена можно приступить непосредственно к измерению ЧКХ. Для этого оператор указывает максимальное значение пространственной частоты, на которой выполняется измерение, шаг изменения частоты и число проекций (сагиттальная, меридиональная или обе). Помимо ЧКХ программа отображает функцию рассеяния линии (ФРЛ), на основе Фурье-преобразования которой строится ЧКХ.





lp/mm	Tan	Theo	Diff	Sag	Theo	Diff
0.0	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10.0	0.977	0.979	-0.002	0.979	0.979	-0.000
20.0	0.952	0.958	-0.006	0.952	0.958	-0.007
30.0	0.927	0.938	-0.010	0.926	0.938	-0.012
40.0	0.902	0.917	-0.015	0.901	0.917	-0.016
50.0	0.875	0.896	-0.021	0.873	0.896	-0.024
60.0	0.850	0.876	-0.026	0.844	0.876	-0.032
70.0	0.821	0.855	-0.034	0.815	0.855	-0.039
80.0	0.792	0.834	-0.042	0.789	0.834	-0.046
90.0	0.762	0.814	-0.052	0.758	0.814	-0.055
100.0	0.731	0.793	-0.062	0.730	0.793	-0.063
110.0	0.703	0.773	-0.069	0.702	0.773	-0.070
120.0	0.674	0.752	-0.078	0.676	0.752	-0.076
130.0	0.646	0.732	-0.086	0.650	0.732	-0.082
140.0	0.618	0.712	-0.094	0.624	0.712	-0.088
150.0	0.592	0.691	-0.100	0.600	0.691	-0.092

Рис. 2. ФРЛ (сверху) и результат измерения ЧКХ на оси – в графическом (в середине) и табличном представлении. Каждый из трех графиков содержит данные, полученные в сагиттальной (синяя кривая) и меридиональной (зеленая кривая) проекциях. Окно с числовыми значениям, помимо этого, отображает отклонения величины контраста от номинальных значений, полученных, при импорте оптической схемы объектива в программу (колонка «Diff»).

Другой разновидностью измерения ЧКХ является ее измерение вне оси, когда требуется оценить качество изображения объектива по полю. Как правило, подобный тип измерений предполагает измерение ЧКХ не в одной внеосевой точке, а в нескольких точках, находящихся в пределах поля зрения объектива. В этом случае оператор задает диапазон изменения угла падения луча (или диапазон перемещения камеры по полю), а также число точек, в которых выполняется измерение (рис. 4).

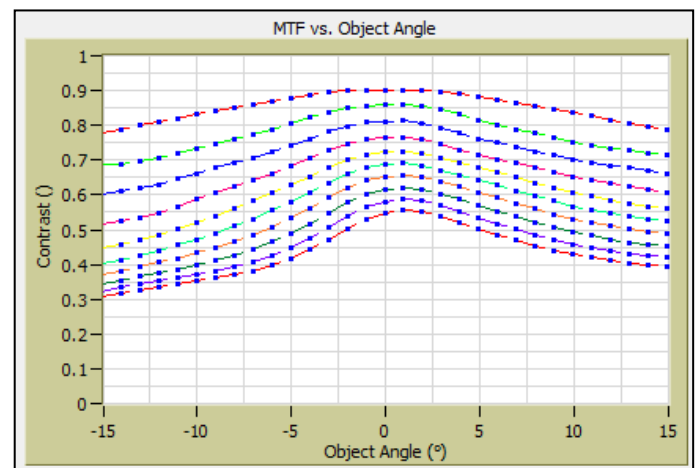
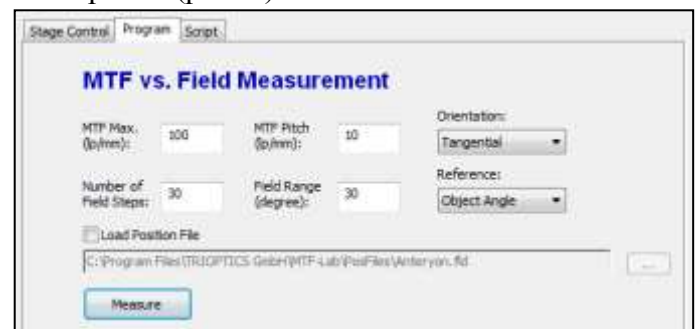


Рис. 3. Параметры измерения (сверху) и график, иллюстрирующий результат измерения ЧКХ по полю. По оси X – угол падения луча ($\pm 15^\circ$), по оси Y – значение контраста (от 0 до 1). Каждая из линий соответствует одной из пространственных частот, на которой выполняется измерение; чем ниже расположена прямая на графике, тем выше значение частоты.



Более подробный и наглядный вид отображения результатов измерения ЧКХ можно получить, выполнив измерение в режиме «ЧКХ по полю по фокусу» (англ. «MTF vs. Field vs. Focus»). В этом режиме программа выполняет сканирование изображения вдоль оптической оси в каждой внеосевой точке. Диапазоны сканирования, смещения по полю и др. параметры измерения задаются оператором. По окончании измерения в отдельном окне появляются результаты в различном графическом представлении – в виде 3D диаграммы (на рисунке 5 слева) и в виде двумерных графиков. 3D диаграмма отображает для одной из двух проекций (сагиттальной или меридиональной) значение контраста изображения в зависимости от положения камеры по полю (смещения от осевого положения) и величины ее дефокусировки (смещения от плоскости наилучшего изображения).

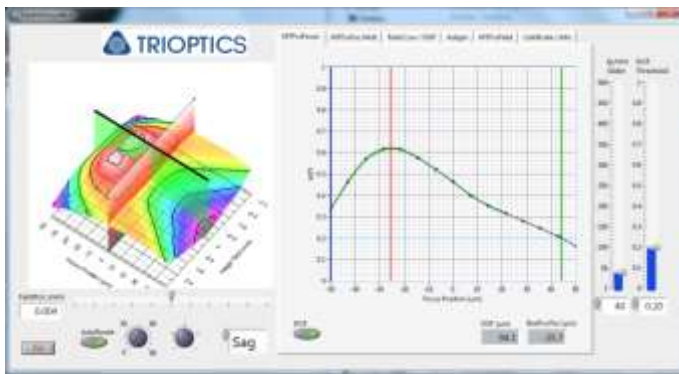


Рис. 4. Результат измерения ЧКХ по полю и по фокусу.

В правой части окна представлены графики, отображающие зависимость контраста от положения по полю в различных видах. Оператор имеет возможность выбрать количество и значения пространственных частот, для которых отображается ЧКХ, величину глубины резкости, а также, переключаясь между вкладками, оценить

степень кривизны поля изображения и величину астигматизма (рис. 6).

Главным преимуществом отображения результатов в этом виде является возможность изменять отдельные параметры измерения после получения результатов (например, изменить значение диапазон пространственных частот или шаг, с которым они меняются).

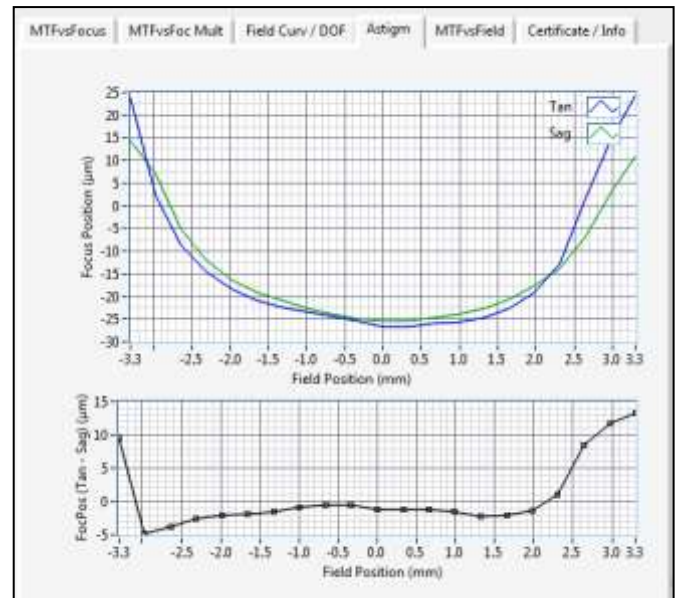
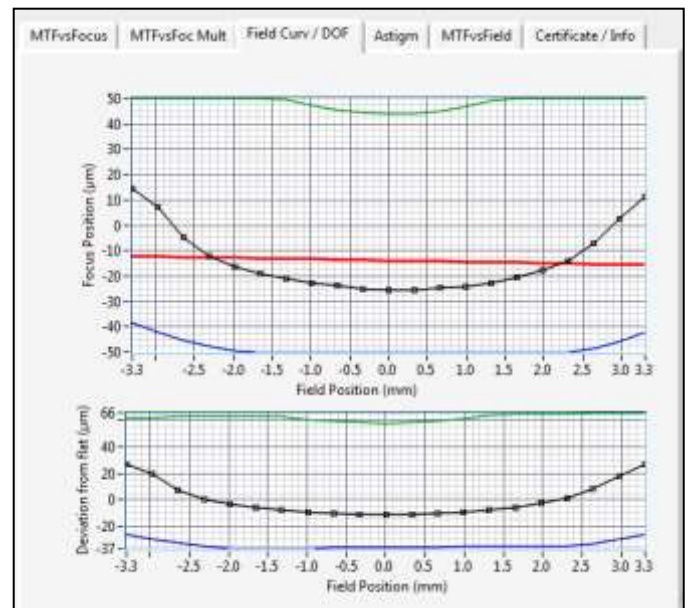


Рис. 5. Графики, отображающие величину кривизны поля изображения (сверху) и астигматизма.



Фокусное расстояние

Помимо ЧКХ станции серии **ImageMaster** позволяют измерить другие оптические параметры. Одним из наиболее востребованных на этапе контроля оптических изделий является фокусное расстояние. Поскольку фокусное расстояние (как правило, измеряется заднее фокусное расстояние f') представляет собой расстояние от задней главной до задней фокальной плоскости, его измерение сопряжено с определенными сложностями, т.к. главная плоскость находится «внутри» оптической системы. Традиционным методом измерения фокусного расстояния является измерение увеличения пары штрихов (см. статью, посвященная приборам серии **OptiSpheric**, в журнал НИТ №6).

В приборах серии **ImageMaster** реализован другой принцип измерения фокусного расстояния с использованием одиночного перекрестия. Фокусное расстояние вычисляется как отношение величины смещения изображения по полю h' к величине поворота приемной части на угол ω :

$$EFL = -\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{h'}{\tan \omega}$$

Перед измерением величину смещения по полю задает оператор, угол поворота рассчитывается автоматически. Точные значения считываются при условии, когда изображение тест-объекта находится в центре ПЗС матрицы. Точность вычисления указанного соотношения определяется за счет использования в приборе высокоточных направляющих. Для получения наиболее точного результата измерение выполняется несколько раз (рис. 7).

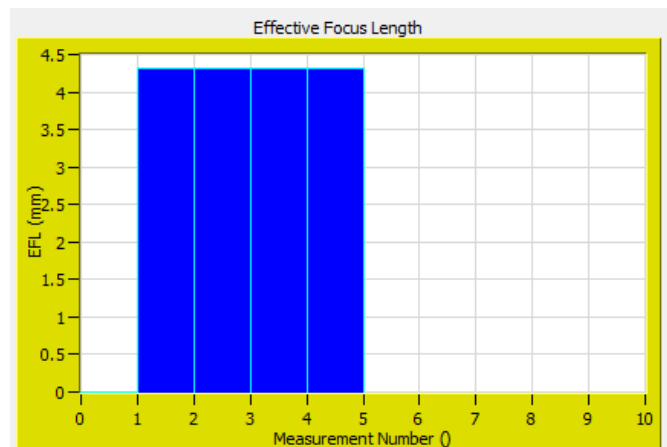


Рис. 6. Результат измерения фокусного расстояния. Каждый столбец – одно из четырех измерений.

Хроматические aberrации

На фотографии хроматическая aberrация проявляется в виде ухудшения качества цветопередачи при формировании изображения (посторонние оттенки и цветные контуры у объектов съемки). Особенно заметно влияние aberrации на контрастных изображениях.

Выделяют два типа хроматических aberrаций – продольную (или т.н. хроматизм положения), проявляющуюся в том, что плоскости фокусировки различных длин волн (т.е. различные цвета) смещены относительно друг друга вдоль оптической оси и поперечную (т.н. хроматизм увеличения) – связанную с тем, что увеличение оптической системы зависит от длины волны.

На приведенных ниже графиках показаны результаты измерения двух типов хроматических aberrаций. Первый график представляет собой зависимость смещения плоскости наилучшего изображения для трех различных длин волн относительно плоскости наилучшего изображения для базовой длины волны. Второй график показывает зависимость



смещения плоскости наилучшего изображения для двух длин волн (синий и красный цвет) относительно плоскости наилучшего изображения для базовой длины волны в зависимости от угла падения луча. В обоих случаях в качестве базовой длины волны выбрана длина волны 546 нм (зеленый свет), однако оператор может изменить это значение в программе.

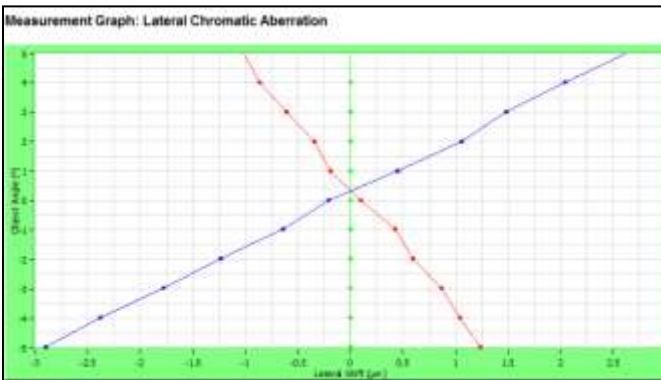
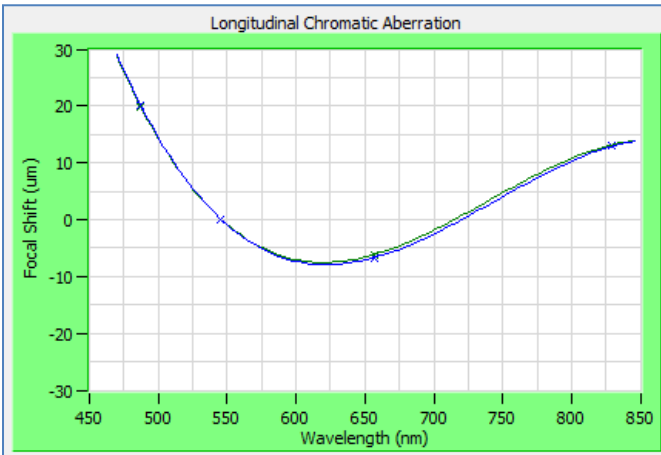
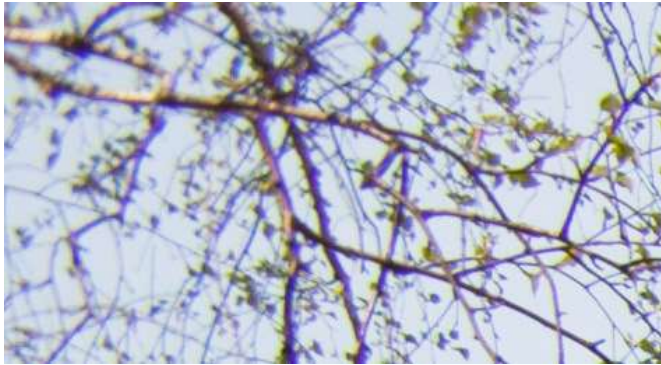


Рис. 9. Результаты измерения хроматической aberrации.

Дисторсия

Еще одно измерение, связанное с анализом изменения изображения по полю – измерение дисторсии. Перед измерением оператор задает диапазон измерения и число шагов. В результате программа вычисляет зависимость смещения изображения по полю от угла поворота приемной части. На основе этой зависимости строится график изменения фокусного расстояния (мм) от угла падения луча ($^{\circ}$).

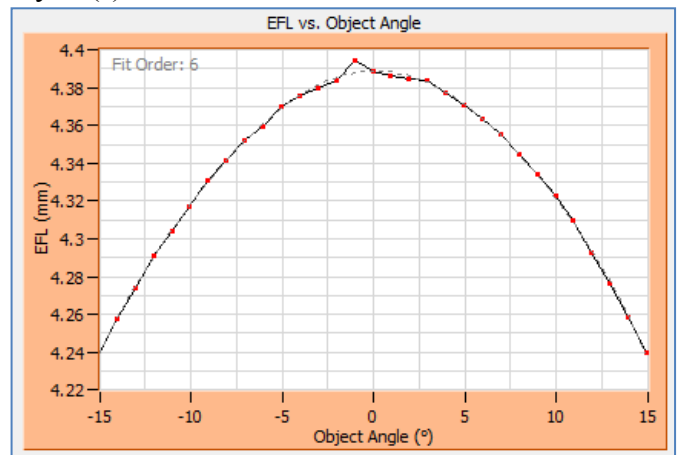


Рис. 10. Результат измерения дисторсии (сверху) и пример дисторсии на фотографии. Дисторсия проявляется в искривлении и искажении геометрии фотоснимка, т.е. масштаб изображения меняется с удалением от центра поля к краям, вследствие чего прямые линии искривляются к центру или к краям.