

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

П.Ю. Орлов, В.В. Некрасов
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Аннотация. Одним из параметров, характеризующих работу целевой аппаратуры (ЦА), является линейное разрешение на местности (ЛРМ). По зарубежным оценкам, современная целевая аппаратура второго поколения обладает геометрическим разрешением (GSD) от 0,5 м до 2,5 м для панхроматического канала и от 2,4 м до 5,0 м для мультиспектральных снимков. Это считается достаточным для решения картографических задач, таких как создание и обновление топографических карт масштаба 1:5000 и мельче, и построение цифровых моделей местности (ЦММ). В работе приведен обзор основных алгоритмов оценки линейного разрешения на местности по снимку, без использования мип. Разработана методика проведения оценки ЛРМ. Проведены экспериментальные оценки ЛРМ по космическим снимкам нескольких алгоритмов. По результатам экспериментальной оценки сформулированы рекомендации по использованию методик и алгоритмов оценки ЛРМ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), линейное разрешение на местности (ЛРМ), «резкий край», полная ширина на половине высоты (FWFH).

Введение

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) и линейное разрешение на местности (ЛРМ) являются важными параметрами, характеризующими эффективность работы целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ценность ЧКХ заключается в том, что она напрямую отражает качество работы системы формирования изображения. В связи с тем, что при запуске КА ДЗЗ его целевая аппаратура подвергается воздействию перегрузок, особенно важно контролировать значение ЧКХ регистрируемых им изображений после его вывода на орбиту. Фактическое значение частотно-контрастной характеристики оказывает непосредственное влияние на изыскания и исследования, проводимые с применением материалов ДЗЗ [13]. В свою очередь ЛРМ оценивается на основе частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) ЦА.

В работе рассмотрены несколько основных методов оценки ЧКХ и ЛРМ. Разработана методика оценки и сопоставления различных методов, требования к искусственным тест-объектам и требования к фрагментам изображений для выполнения оценок ЛРМ. Также представлены экспериментальные результаты сравнения различных методов и даны рекомендации по выбору и применению данных методов.

В существующей литературе понятие функции передачи модуляции (ФПМ) превалирует над понятием частотно-контрастной характеристики по ГОСТ 21815.18-90 [4]. Тем не менее, это не совсем верно. Само понятие ФПМ является результатом грубого перевода советскими специалистами ещё в 70-е годы 20 века английского понятия Modulation Transfer Function. Само по себе оно трудно для восприятия и не несет в себе такой информативности как ЧКХ и её сопутствующий график.

Современные методы оценки эффективности работы ЦА

Существующие методы измерения ЧКХ можно разделить на две категории: прямые и косвенные измерения (рис. 1). При прямом методе, частотно-контрастная характеристика получается путем непосредственного измерения коэффициента передачи контраста объектного пространства и пространства образов, идентифицируемого системой формирования изображения при различных пространственных частотах, с применением синусоидальных и штриховых мир.

Косвенные измерения в основном базируются на применении преобразований Фурье: измеряется отклик системы оптического формирования изображения на ступенчатые или импульсные сигналы, а затем рассчитывается ЧКХ. Данную категорию можно разделить на три метода: метод измерения точечного источника света, метод «резкого края» и импульсный метод. Основа косвенного метода заключается в том, что значение модуля функции рассеяния точки (ФРТ), полученной из изображения, и обработанного путем применения преобразования Фурье, равняется значению частотно-контрастной характеристики системы формирования изображений [13].

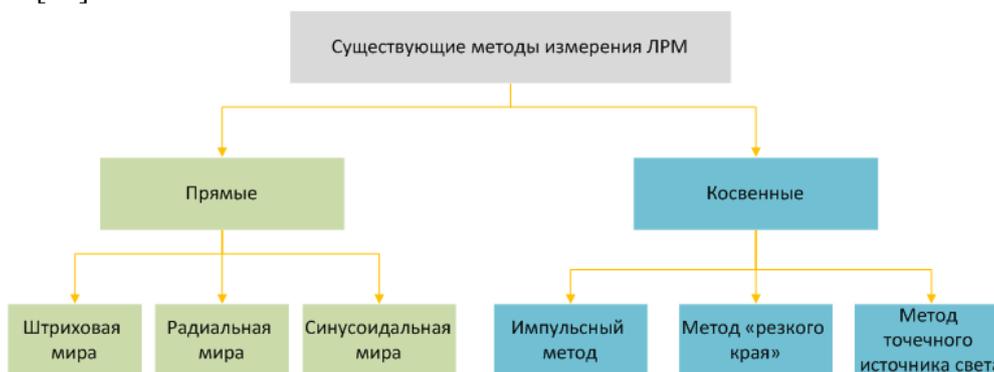


Рис. 1. Методы измерения ЛРМ

Отметим, что линейное разрешение снимка на местности (ЛРМ) можно определить как точку пересечения ЧКХ и некоторой пороговой характеристики, наклон которой зависит от уровня шума изображения, заданного контраста и других характеристик съёмочной системы [1, 2]. Также ЛРМ может быть получено, если известно значение полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWFH) нормализованной функции рассеивания линии (ФРЛ) [10]. В настоящей работе для определения линейного разрешения использовались значения пространственной частоты на пересечении с горизонтальными порогами уровня контраста [1, 3]: 0,5 – реальная разрешающая способность; 0,2 – пороговая разрешающая способность; 0,1 – предельная разрешающая способность. Использование порога контраста 0,05, представленного как критерий для нахождения ЛРМ в работе [5], нельзя применять для фотометрических исследований, т.к. он на выходе дает завышенную оценку ЛРМ и применим лишь в оптике. Кроме того, было взято значение уровня контраста на частоте Найквиста, определяемое по формуле:

$$MTF_{NQ} = \frac{1}{2 \cdot GSD}, (1)$$

где GSD – геометрическое разрешение.

С учетом пространственной частоты, определяемой по графику ЧКХ на данном уровне, также можно получить значение ЛРМ.

Также существует методика оценки показателей качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции, как в цифровой, так и в аналоговой формах, утвержденная Федеральной службой геодезии и картографии России [7].

Методы измерения ЧКХ изображения **Метод «резкого края»**

В данном методе ЧКХ измеряется путем выделения «резкого края» из сформированных изображений естественных и искусственных объектов, находящихся на земной поверхности. Функция рассеивания края (ФРК, в иностранной литературе ESF) рассчитывается как функция от значения, зарегистрированного системой для «резкого края», затем дифференцируется для того, чтобы получить функцию рассеивания линии (ФРЛ, в иностранной литературе LSF), которая в свою очередь через преобразование Фурье возвращает кривую ЧКХ, перпендикулярную к ФРЛ. Метод «резкого края» широко применяется на практике.

Однако, поскольку на расчет ЧКХ могут повлиять целый ряд факторов, необходимо уделить особое внимание правильности подбора кривой аппроксимации «резкого края» и его местоположения.

Область с «резким краем» описывается функцией Хэвисайда. Съёмка подобного объекта целевой аппаратурой КА ДЗЗ позволяет получить точную функцию рассеивания края. Производная одномерного профиля ФРК позволяет оценить одномерный поперечный срез профиля ЧКХ в направлении нормали к краю. В качестве подобных объектов могут служить как искусственные (окрашенные или выполненные из темной и светлой брезентовой ткани), так и естественные объекты: поля, автостоянки, переходные участки между землей и антропогенными объектами, водой и шельфовым льдом [8].

На рис. 2 представлен схематичный пример «резкого края». Для точной оценки ЧКХ с помощью данного метода необходимо, чтобы:

- объект, содержащий «резкий край» должен быть достаточно большим, чтобы из него можно выделить область, не подвергающуюся воздействию окружающих пикселей;
- длина переходного участка L_T , представленного на рис. 2, должна быть больше, чем радиус ширины функции рассеяния точки. По грубым оценкам считается [11], что он равен 3 – 5 размерам пикселя на земной поверхности (GSD). *Примечание: в отечественной практике размер пикселя на земной поверхности или расстояние между центрами соседних пикселей на земле также известно как геометрическое разрешение снимка.*

Угол края α к направлению профиля ЧКХ, должен быть около 90° . Небольшое отклонение от 90° необходимо, чтобы иметь возможность провести передискретизацию функции рассеивания края. Авторы работы [11] предполагают, что разницу в 8 градусов от 90° нужно считать почти идеальной. Кроме того, разница темной и светлой области, деленная на среднеквадратическое отклонение шума должно быть больше 50.

Ключевые параметры области с «резким краем»:

- дифференциальная яркость ΔL между темной и светлой частями области;
- ширина по направлению профиля ЧКХ исследуемой области, называемая L_W ;
- угол ориентации к направлению профиля ЧКХ;
- высота области L_H по нормали к профилю ЧКХ.

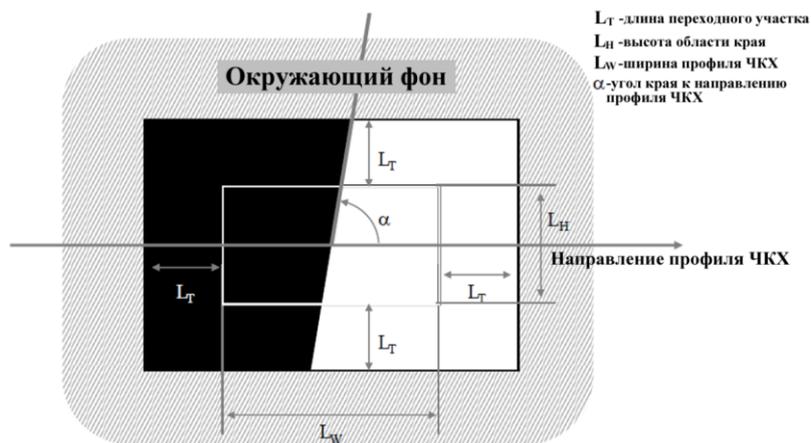


Рис. 2. Схематичное представление «резкого края»

Преимущества: Можно сравнительно легко разместить на земной поверхности искусственные объекты, содержащие резкий край и получить надежные результаты.

Недостатки: Объекты земной поверхности, содержащие «резкий край», охватывают анализ ЧКХ лишь в двух направлениях и не могут полностью выявить двухмерные кривые рассеивания точки системы формирования изображения. В случае если подобных объектов нет, данный метод восприимчив к отношению сигнал-шум и контрасту природных объектов, что приводит к неустойчивости получаемой ЧКХ изображения [13].

Импульсный метод

При импульсном методе, на изображениях ДЗЗ выделяются линейные объекты, такие как осевые линии мостов и взлетно-посадочных полос. Они используются для подбора функций рассеивания линии (ФРЛ). Затем происходит их обработка с помощью преобразования Фурье, а значение искомой ЧКХ равно отношению их АЧХ. Также этот метод основан на том факте, что частотно-контрастная характеристика может быть получена путем обработки ФРЛ с помощью преобразования Фурье.

Объект, содержащий импульс, состоит из светлой области, окруженной темными областями (рис. 3). Ключевые параметры области с импульсом:

- дифференциальная яркость ΔL между темной и светлой частями области;
- ширина импульса, обозначенная W ;
- угол ориентации α к направлению профиля ЧКХ;
- высота области L_H по нормали к профилю ЧКХ. Важность угла ориентации и высоты области в данном методе такая же, как и в методе «резкого края» [8].

Изображение m , содержащее область с импульсом, представляет собой набор дискретизированных функций рассеивания линии высот L_H в направлении профиля ЧКХ, свернутый импульсом ширины W , обозначенным как π_W .

Преимущества: Данный метод является интуитивно-понятным при выборе объектов исследования, таких как искусственные мосты и шоссе, в меньшей степени подвержен влиянию фонового шума, и более вероятно, приведет к достоверным результатам.

Недостатки: При различных значениях пространственного разрешения ЦА КА ДЗЗ, не представляется возможным установить идеальные наземные цели. К тому же нужно много времени, чтобы найти импульс объектов земной поверхности вдоль фиксированного направления [13].

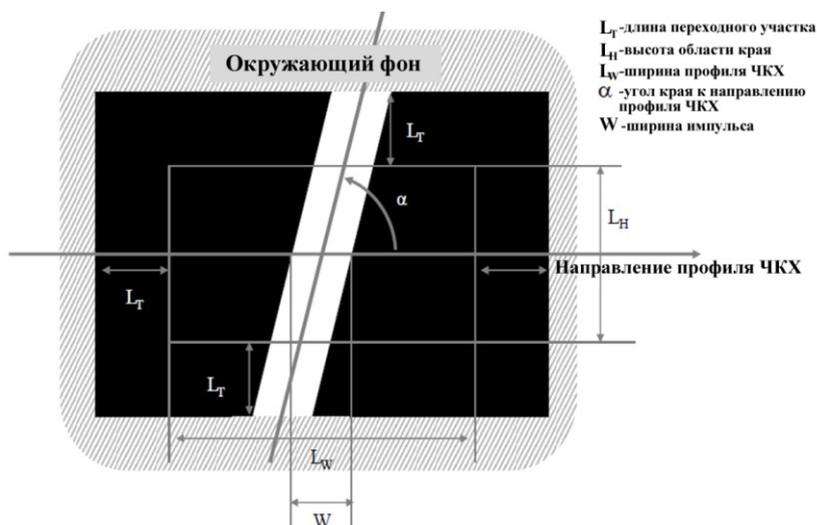


Рис. 3. Схематичное представление области, содержащей импульс

Метод точечного источника света

Для идеальной системы формирования изображения, яркое пятно объектного пространства должно быть зарегистрировано в виде пятна при проецировании в пространство образов (рис. 4). Тем не менее, для реально существующих систем, при переносе изображения из объектного пространства в пространство образов, будет происходить снижение качества, при котором яркое пятно будет изображаться в виде точки. Функция распределения уровня яркости отклика системы на идеальный точечный источник света в объектом пространстве может быть аппроксимирована с помощью функции рассеивания точки (ФРТ, в иностранной литературе PSF), которая затем может быть обработана с помощью преобразования Фурье для получения кривых ЧКХ.

Преимущества: Теоретически, этот метод является наиболее полноценным; он может обнаружить кривые ЧКХ и кривые точек рассеивания в любом направлении; он возвращает действительные двумерные функции рассеивания точки, и тем самым более точно выявляет возможности датчика формировать изображения объектов земной поверхности.

Недостатки: Данный метод требует наличия точечных источников света на земной поверхности, которые трудно найти [13].

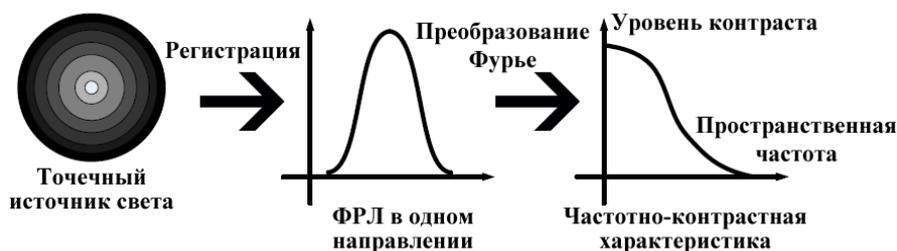


Рис. 4. Определение ЧКХ по методу точечного источника света

Методические основы

Исследование параметров целевой аппаратуры по методу «резкого края» «Резкий край»: отечественный и зарубежный подход

Поскольку на космических снимках наиболее вероятно обнаружить области, содержащие «резкий край», было решено рассмотреть данный метод для нахождения линейного разрешения на местности.

При изучении отечественной и зарубежной литературы стало понятно, что подходы использования «резкого края» для нахождения ЛРМ в России и за рубежом отличны друг от друга, поэтому для анализа и экспериментальной проверки были взяты подходы, представленные в работах МИИГАиК и университета Сапиенца (Рим, Италия).

Отечественный подход определения параметров ЦА по методу «резкого края»

Для нахождения ЛРМ снимка по данной методике, описанной в работе [1], необходимо иметь начальные параметры ЦА: высоту фотографирования, фокусное расстояние и разрешающую способность съёмочной системы. Т.е. линейное разрешение на местности, определяется по формуле:

$$L_{obj} = \frac{H}{2ff_{res}}, (2)$$

где H – высота съёмки; f – фокусное расстояние сенсора; f_{res} – разрешающая способность съёмочной системы.

В свою очередь физическая разрешающая способность съёмочной системы f_{res} определяется как произведение максимальной $j_{threshold}$ и граничной пространственной частоты Δf . Максимальная (предельная) пространственная частота находится по графику в точке пересечения кривой ЧКХ и прямой порогового яркостного контраста на уровне 10% (ЧКХ = 0,1). Граничная (пороговая) пространственная частота равна нижней границе спектральной функции, полученной с помощью преобразования Фурье. Однако в ходе исследований стало ясно, что подобный метод определения физической разрешающей способности, работает только для снимков Канопус-В, и не применим для другой космической продукции, например Landsat-8, что методологически не верно. Поэтому мы будем приравнивать разрешающую способность съёмочной системы к максимальной пространственной частоте.

Можно выделить следующие этапы в рамках данного подхода:

- На изображении производится выборка нескольких зон (в нашем случае пять: центральная область и по углам снимка). Далее в каждой области необходимо вырезать по несколько фрагментов, содержащих пограничный переход. Размер фрагментов должен быть равен 2^n , при этом показатель степени n зависит от пространственного разрешения исследуемого изображения и выбирается с учетом параметров ЦА, посредством которой был получен исследуемый снимок [1].
- Из каждого вырезанного фрагмента выбирается столбец или строка, в зависимости от ориентации пограничного перехода, желательно ближе к середине изображения. Полученное графическое изображение даст профиль пограничного перехода $DN(n)$, представляющий собой функцию рассеивания края.
- Для проведения дальнейшего анализа (преобразования Фурье и анализа полученных спектров) необходимо получить функцию рассеивания линии путём вычисления разности предыдущих и последующих пикселей ФРК.

- Создается пустой спектр, длиной i , равный длине реализации преобразования Фурье. В его начало добавляется полученная ФРЛ, а затем обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье.
- Параллельно задается диапазон пространственных частот, равный половине длины реализации преобразования Фурье + 1 элемент. Дискретность пространственных частот определяется как:

$$\Delta f = \frac{1}{pxl \cdot i}, (3)$$

где i – длина реализации преобразования Фурье; pxl – линейный размер светочувствительного элемента матрицы ЦА.

- Полученный в результате БПФ спектр нормируется по первому (максимальному) значению. Результатом является убывающая функция, изменяющаяся в пределах $[0; 1]$, она представляет частотно-контрастную характеристику изображения.
- Искомая ЧКХ берется по модулю (для избавления от комплексной части) и откладывается на графике относительно ранее рассчитанного диапазона пространственных частот.

Зарубежный подход определения параметров ЦА по методу «резкого края»

После выбора на изображении подходящей области, содержащей «резкий край», вначале алгоритм определяет местоположение края с субпиксельной точностью; предполагая, что выбранные участки края находятся на одной прямой, производится аппроксимация всех узлов края методом наименьших квадратов. Профили края, которые сосредоточены на каждом пикселе края и имеют направление, перпендикулярное к краю, интерполируются кубическими сплайнами. Эти функции усредняются и интерполируются с помощью аналитической функции, чтобы получить эмпирическую функцию рассеивания края (ФРК). Затем ФРК дифференцируются, в результате получается функция рассеивания линии (ФРЛ). Наконец к ФРЛ применяется преобразование Фурье, результат нормализуется и получается искомая ЧКХ [10].

После применения преобразования Фурье, вычисленная ЧКХ масштабируется по оси частот для того, чтобы представить ее в сравнении с частотой Найквиста исследуемого изображения. Кроме того, на основе рассчитанной ФРЛ вычисляется значение полной ширины на половине высоты (FWFH). Индекс этого значения равен размеру пикселя цифрового космического изображения на местности (GSD). Для получения реальной линейной разрешающей способности изображения необходимо умножить полученное значение параметра GSD на эмпирический коэффициент $1,5 \div 2$ [3]. Важно отметить, что нахождение этого параметра в рамках отечественного подхода приводит к получению неадекватного результата. Впрочем, его умножение на эмпирический коэффициент без привязки к целевой аппаратуре также сомнительно.

Таким образом, можно выделить следующие этапы:

- выбор области, содержащей «резкий край»;
- распознавание края и его аппроксимация по методу наименьших квадратов кубическим полиномом;
- линейная аппроксимация полученных новых центров края в каждом профиле и получение субпиксельного края;
- построение перпендикуляров к центрам субпиксельного края в каждом профиле;

- получение новых профилей вдоль перпендикуляров с интерполированными значениями яркости;
- аппроксимация профилей, полученных на предыдущем этапе, кубическим сплайном;
- расчёт средней ФРК по полученным на предыдущем этапе профилям и её ФРЛ;
- интерполяция полученной ФРК эмпирической сигмной и получение интерполированной ФРЛ;
- определение значения полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWFH) из ФРЛ.

Поскольку авторы подхода не приводят сведения о том, как определять ЛРМ, мы применим параметры дискретного спектра и основную формулу из отечественного подхода. Таким образом, при реализации данного подхода должны быть добавлены следующие этапы:

- получение комплексного спектра посредством преобразования Фурье;
- определение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) исследуемого изображения;
- нормирование его по максимальному значению спектра и построение графика с учетом выбранной пространственной дискретизации;
- расчет значения ЛРМ по формуле из отечественного подхода.

Требования к тест-объектам и фрагментам изображений

«Резкий край» должен иметь небольшой наклон, т.е. быть чуть больше или чуть меньше 90° . Отклонение в 8° считается идеальным [8, 11]. При этом наклон края не имеет значения в отечественном подходе, а применим лишь в зарубежном, изложенном в работе [10].

При выборе фрагментов, содержащих пограничный переход, нужно исходить из следующих соображений: при работе со снимками, полученными с помощью ЦА высокого разрешения (от 3 до 0,5 м), фрагмент изображения должен иметь размерность 16x16 пикселей. Для снимков сверхвысокого разрешения (от 0,1 до 0,5 м), фрагмент с «резким краем» должен быть 8x8 пикселей [1, 10]. Для нашего эксперимента мы будем брать тестовые области размером 16x16 пикселей.

Экспериментальные результаты. Отечественный подход

Были выбраны три реальных «резких края» с космических изображений Канопус-В, представленные на рис. 5. Кроме того, в работе [9] была почерпнута идея о возможности сокращения влияния шумов на искомую ЧКХ, а значит и значение ЛРМ. Автор предположил, что влияние шумов от неоднородностей по обе стороны от резкого края можно довольно легко нивелировать путем простого обрезания (обнуления) значений ФРЛ по обе стороны от пика. На рис. 6 представлены графики ФРЛ с исходными и скорректированными значениями и сопутствующие им графики ЧКХ. Очевидно, что подобный метод действительно может улучшить точность определения ЛРМ. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

ЛРМ (в метрах) в различных профилях, взятых в реальных изображениях

	Реальный случай 1 – Ориг. ФРЛ	Реальный случай 1 – Скор. ФРЛ	Реальный случай 2– Ориг. ФРЛ	Реальный случай 2– Скор. ФРЛ	Реальный случай 3 – Ориг. ФРЛ	Реальный случай 3 – Скор. ФРЛ
ЧКХ 0.5	5,753 м	5,731 м	3,258 м	3,757 м	2,673 м	3,135 м
ЧКХ _{Найквист}	4,553 м	4,36 м	2,935 м	2,745 м	2,415 м	2,456 м
ЧКХ 0.2	4,331 м	4,208 м	2,895 м	2,631 м	2,377 м	2,381 м
ЧКХ 0.1	3,281 м	3,754 м	2,788 м	2,341 м	-	2,182 м

Среди реальных изображений «резкого края», наиболее низкое ЛРМ отмечено в реальном случае №1 – тени от здания. Связано это с неоднородностью значений яркости по обе стороны от края. Напротив, в реальном случае №3 полученные значения ЛРМ максимально близки к заводским показателям ЦА, что обусловлено особенностями регистрации глубоких водоёмов на панхроматических изображениях, т.е. их большей однородностью. Также нужно отметить, что в подобных случаях важно отсутствие растительности вдоль берега, дабы снизить неоднородность светлой области. Коррекция ФРЛ позволила получить незашумленные графики ЧКХ, а значит и более точные значения ЛРМ. Кроме того, для третьего снимка удалось получить значение ЛРМ при пороговом значении ЧКХ равным 0,1, который является главным критерием определения линейного разрешения.

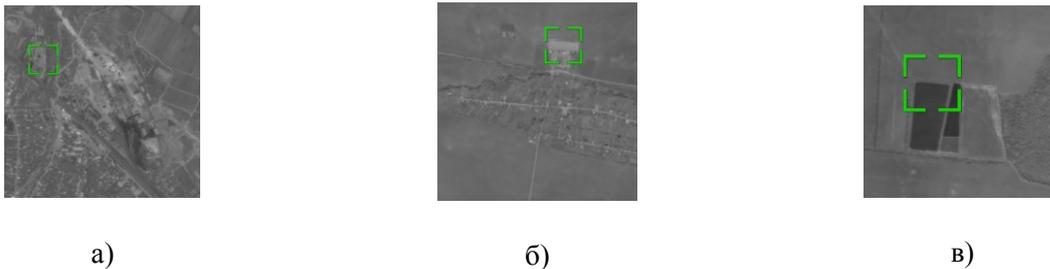


Рис. 5. Выбор «резких краев» на реальных изображениях. На рис. 9а и 9б представлены пограничные переходы от зданий (реальные случаи №1 и 2), а на 9в – от антропогенного водоёма (реальный случай №3)

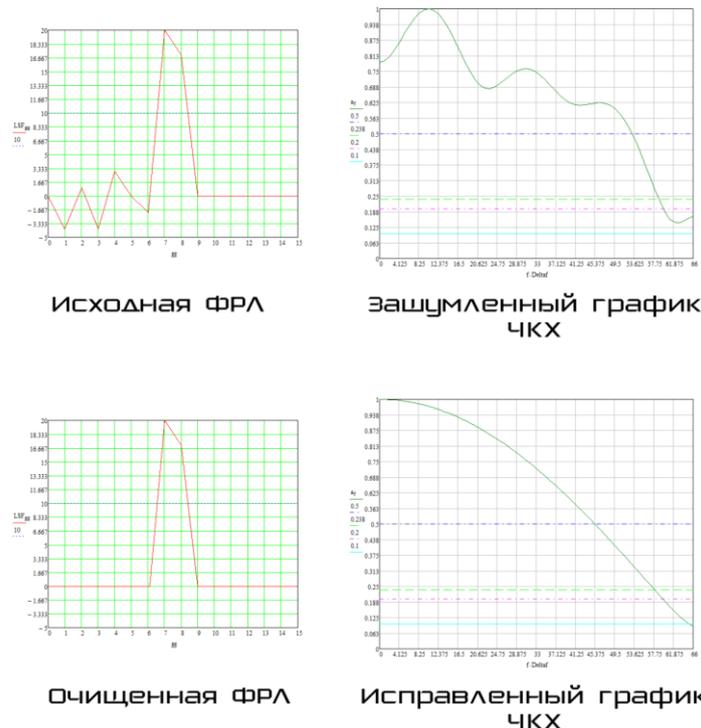


Рис. 6. Сравнение зашумленных графиков ФРЛ и ЧКХ с очищенными экземплярами

Зарубежный подход

По аналогии применяем к трем снимкам Канопус-В итальянский подход определения ЛРМ. Важно отметить, что авторы данного подхода в своей работе [10] говорили о формировании новых профилей яркостей вдоль перпендикуляров к «резкому краю». Однако о том, каким образом необходимо присваивать значения яркости каждому пикселю, авторы статьи не приводят. Кроме того, с учетом небольшого значения угла наклона края (не более 8 градусов) перпендикуляры не покидают пределы исходных профилей. Поэтому было принято решение брать исходные значения яркости вдоль перпендикуляров. Тем не менее, в дальнейших исследованиях необходимо проверить возможность применения бикубической, а также других видов интерполяции в подобных случаях.

Таблица 2

Сравнение результатов в рамках отечественного и зарубежного подхода к методу «резкого края»

	Реальный случай 1 - Отечественный	Реальный случай 1 - Зарубежный	Разница (%)	Реальный случай 2 - Отечественный	Реальный случай 2 - Зарубежный	Разница (%)	Реальный случай 3 - Отечественный	Реальный случай 3 - Зарубежный	Разница (%)
ЧКХ 0.5	5,753 м	8,281 м	36,03%	3,258 м	10,361 м	104,31%	2,673 м	10,491 м	118,78%
ЧКХ _{Найкв} ист	4,553 м	6,159 м	29,98%	2,935 м	7,728 м	89,81%	2,415 м	7,839 м	105,79%
ЧКХ 0.2	4,331 м	5,944 м	31,4%	2,895 м	7,432 м	87,87%	2,377 м	7,541 м	104,13%
ЧКХ 0.1	3,281 м	3,057 м	7,07%	2,788 м	3,899 м	33,22%	-	3,767 м	-

Результаты применения данного подхода представлены в табл. 2 и сравнены с полученными значениями ЛРМ посредством отечественного подхода (без коррекции ФРЛ). Разница между полученными результатами растет с уменьшением неоднородности тестовых областей. Суть в том, что в отечественном подходе предполагается использование лишь одной строки, которая является наиболее однородной. Напротив, в зарубежном подходе используется вся тестовая область (16 профилей). Их аппроксимация (в контексте работы [10] – двойная), усреднение и интерполяция, на однородных областях ведет к большей потере информации. Кроме того, отсутствие учета оставшихся 15-ти профилей в отечественной методике, также может влиять на итоговый результат.

Также были проведены экспериментальные расчеты линейного разрешения ортотрансформированного панхроматического снимка Landsat-8. Для расчёта линейного разрешения были использованы следующие параметры ЦА: f – фокусное расстояние сенсора = 886 мм; H – высота фотографирования = 705 км; Pxl – линейный размер светочувствительного приемника матрицы = 18 мкм [12].

Данный панхроматический снимок на территорию Волгодонска и окрестностей за 30 июня 2014 года был получен с помощью web-ГИС Land Viewer, а сопутствующие атрибутивные данные – с помощью сервиса EarthExplorer Геологической службы США. Снимок был сделан в надир в 8:00 по Гринвичу при нулевом уровне облачности. Высота Солнца над горизонтом составила 61,41 гр., а азимут Солнца – 141,59 гр.

На снимке были определены 5 зон, в пределах которых отбирались области (по одной на зону), содержащие «резкий край», т.к. известно, что значение линейного разрешения может меняться в пределах снимка и достигать наилучшего значения в центре снимка. Были применены, как зарубежный, так и отечественный подход, причем в последнем использовались исходная и скорректированная ФРЛ. Результаты представлены в табл. 3.

В рамках отечественного подхода на основе 2 из 5 полученных графиков значение ЛРМ удалось получить лишь на уровне ЧКХ 0,5. Для 5 области график не пересек ни один из порогов. Это говорит о том, что крутизна и однородность областей по обе стороны от края имеют решающее значение, а поскольку был взят лишь один профиль на область, то усреднение не представляется возможным. Применение среза шумов в ФРЛ не изменило ситуацию для вышеупомянутых областей, однако позволило приблизить другие полученные значения к значениям ЛРМ, полученным в рамках зарубежного подхода.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета ЛРМ на 5 областях ортотрансформированного панхроматического снимка Landsat-8 с помощью отечественного и зарубежного подходов в рамках метода «резкого края». Разница подсчитана для обеих ФРЛ. * обозначены ЛРМ, полученные не на уровне 0,1 ЧКХ. Прочерком обозначены случаи, когда ни один из порогов так и не был достигнут

		Отечественная методика «резкого края»						
		Область 1	Область 2	Область 3	Область 4	Область 5	Среднее по областям	Минимальное по областям
ЛРМ (м)	Исходная ФРЛ ¹	15,2 м*	16,191 м	17,58 м	20,554 м*	-	17,381 м	15,2 м
	Обрезанная ФРЛ ²	-	17,8 м	17,58 м	20,036 м*	-	18,472 м	17,58 м
	Зарубежная методика «резкого края»							
		15,904 м	19,097 м	19,177 м	20,326 м	15,455 м	17,992 м	15,455 м
Разница ¹ (%)		4,52%	16,47%	8,69%	1,11%	-	7,6975%	1,11%
Разница ² (%)		-	7,03%	8,69%	1,43%	-	5,72%	1,43%

Зарубежный подход лучше себя проявил на всех областях, при этом разница с отечественным подходом не превышала и 10%. Очевидно, что сказывается использование всех профилей в пределах области размером 16×16 пикселей. Однако итоговые графики имеют синусоидальные всплески, что говорит о влиянии аппроксимации кубическими полиномами. При этом построение новых профилей на основе яркостей пикселей вдоль перпендикуляров к «резкому краю» не решит данной проблемы, особенно в случае однородных областей. Значение уровня контраста на частоте Найквиста для изображений Landsat-8 составило 0,033, что ниже различимого глазом контраста. Данное значение было получено в одном случае из пяти в отечественном подходе и в трёх случаях из пяти в зарубежном подходе. Тем не менее, на средние значения ЛРМ в обоих подходах это не повлияло.

Также для оценки эффективности отечественного и зарубежного подходов была синтезирована радиальная мира со следующими параметрами: R – полный наблюдаемый на изображении диаметр мира = 250 пикселей; r – диаметр пятна размытия в центре мира = 11 пикселей; d – фактическая длина основания сектора мира = 48,25 пикселей [2, 6].

С учетом размера проекции пикселя на земную поверхность в 2,1 метра,

$$d = 48,25 \cdot 2,1 = 101,325 \text{ м. (4)}$$

Тогда линейное разрешение мира составит:

$$L = \frac{r}{R} \cdot d = 4,46 \text{ м. (5)}$$

На местности диаметр подобной виртуальной мира составил бы 525 метров.

Выберем три области, содержащие «резкий край» на изображении и применим к ним отечественный и зарубежный подходы расчета ЛРМ. Результаты представлены в табл. 4. Наименьшая разница с эталоном при отечественном подходе в 3,11% достигнута при уровне модуляции в 20%. Наименьшая разница при зарубежном подходе достигнута при уровне модуляции в 10% и составила 4,01%. Итоговые графики ЧКХ при зарубежном подходе имеют синусоидальные всплески, что свидетельствует о возмущениях и искажениях информации в результате аппроксимации и интерполяции в ходе его выполнения. Кроме того, итоговое значение разрешающей способности приходится брать при последнем вхождении графика в 10%-ый порог, в связи с наличием вышеуказанных всплесков. Это характерно как для однородных, так и неоднородных областей, содержащих «резкий край». Напротив, отечественный подход прекрасно показывает себя на однородных областях. В случае неоднородных областей, необходимо выполнять коррекцию ФРЛ перед построением графика ЧКХ и брать значение разрешающей способности на уровне модуляции 0,5. Также нужно отметить, что отечественный метод имеет слабую чувствительность к смещению «резкого края» в пределах выбранной области (область 1 – строго по центру, область 2 и 3 – смещены на один пиксель от центра области). Напротив, изменение положения края в пределах области приводит к изменениям в определяемой итоговой ФРЛ в зарубежном подходе, что неминуемо отражается на искомом линейном разрешении.

Также были сгенерированы шесть графиков ЧКХ с известным значением ЛРМ, а затем восстановлены соответствующие им профили, содержащие «резкий край». К ним были применены оба подхода определения линейного разрешения, результаты которого представлены в таблице 5. В пяти из шести случаев удалось восстановить исходный график ЧКХ с СКО в пределах 10% практически на всем протяжении (рис. 7).

Таблица 4

Сравнение результатов расчета ЛРМ по сравнению с предварительно синтезированным эталонным тест-объектом (мирой)

		Отечественный подход						
ЛРМ (м)	Мира	Область 1	Область 2	Область 3	Среднее по областям	Минимальное по областям	Средняя разница (%)	
ЧКХ 0,5	4,47 м	6,6 м			6,6 м	6,6 м	38,48%	
ЧКХ _{Найквист}		4,75 м			4,75 м	4,75 м	6,07%	
ЧКХ 0,2		4,333 м			4,333 м	4,333 м	3,11%	
ЧКХ 0,1		3,611 м			3,611 м	3,611 м	21,25%	
		Зарубежный подход						
ЛРМ (м)	Мира	Область 1	Область 2	Область 3	Среднее по областям	Минимальное по областям	Средняя разница (%)	
ЧКХ 0,5	4,47 м	11,002 м	12,596 м	11,413 м	11,670 м	11,002 м	89,21%	
ЧКХ _{Найквист}		8,243 м	9,492 м	8,518 м	8,751 м	8,243 м	64,76%	
ЧКХ 0,2		7,491 м	9,136 м	8,19 м	8,27 м	7,491 м	59,65%	
ЧКХ 0,1		3,968 м	4,586 м	4,328 м	4,294 м	3,968 м	4,01%	

Сравнение результатов расчета ЛРМ сгенерированных по графику ЧКХ изображений

	Исходное (м)	По отечественному подходу (м)	По зарубежному подходу (м) *	Разница с исходным - отечественный (%)	Разница с исходным - зарубежный (%)	Разница между подходами (%)
ЛРМ изображения №1	3,228	3,068	2,747	5,08	16,1	11,04
ЛРМ изображения №2	2,831	2,683	2,771	5,37	2,14	3,23
ЛРМ изображения №3	6,159	6,253	4,251	1,51	36,65	38,12
ЛРМ изображения №4	2,499	2,502	4,275	0,12	52,44	52,32
ЛРМ изображения №5	2,219	2,267**	3,895	2,14	54,82	52,83
ЛРМ изображения №6	28,404	20,289**	11,298	33,33	86,17	56,93

* - на уровне контраста 0,1

** - на уровне контраста 0,5

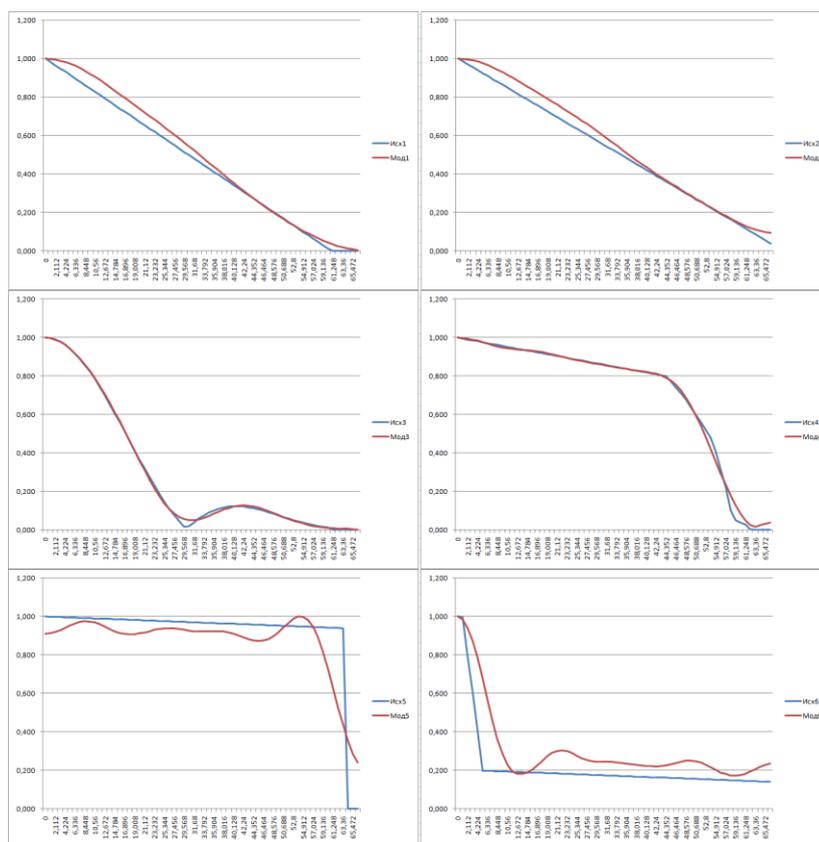


Рис. 7. Сравнение сгенерированных и восстановленных графиков ЧКХ, по которым в ходе эксперимента проводилось определение ЛРМ

Выводы

Отечественный подход в рамках метода «резкого края» прост в исполнении и может давать адекватное значение искомого ЛРМ в случае правильно выбранной тестовой области. Срез шумов в ФРЛ, описанный в работе [9], также себя оправдывает и позволяет точнее определить линейное разрешение в случае выбора неоднородной области, содержащей «резкий край». Тем не менее, неудачный выбор области и профиля в нем может дать неприемлемый результат. Поэтому необходимо проработать варианты совершенствования подхода, в том числе, учитывая и остальные профили тестовой области. Эксперимент с мирой заданного разрешения показал, что искомое значение ЛРМ нужно определять по уровню контраста, соответствующего частоте Найквиста, а не на других уровнях модуляции, фигурирующих в отечественных работах.

Зарубежный подход определения ЛРМ позволяет получить результат на тех областях, которые оказались неподходящими в отечественном подходе. Однако плохое описание принципа использования профилей яркостей вдоль перпендикуляров к краю, не позволяет в полной мере проверить данный метод в его изначальном исполнении. Одна из ошибок его реализации в настоящей работе заключается в использовании полиномов третьей степени для аппроксимации профилей, а не кубических сплайнов, что смазывало итоговую ФРК и ФРЛ, а значит, влияло на итоговый график ЧКХ и искомое ЛРМ. Также нужно отметить, что при нахождении субпиксельного края лучше использовать небольшой участок профиля, содержащий по два-три пикселя вокруг края, что может повысить точность определения. Помимо прочего, операции аппроксимации и интерполяции профилей накладывают свой отпечаток на итоговый график ЧКХ, а значит и на значение ЛРМ. Необходимо рассмотреть варианты замены аппроксимирующих полиномов третьей степени на вторую для выделения субпиксельного края, а также другие способы получения усредненной ФРК.

Литература

1. Аникеева И.А., Попов С.М. Методика определения передаточных свойств материалов ДЗЗ на основе пространственно-частотных характеристик // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2014. № 7-1. С. 144–146.
2. Бочарников А.И., Жиличкин А.Г., Коваленко В.П., Кондратов А.В., Тихоньчев В.В., Худяков А.В. Технологии определения характеристик целевой аппаратуры КК ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 2. С. 18–31.
3. Замшин В.В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. №1. С. 43–51.
4. ГОСТ 21815.18–90. Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения пространственной частотно-контрастной характеристики. М., 1991. 18 с.
5. Методическое пособие по курсу «Техника и технология аэрокосмической съемки» Раздел «Цифровые аэрофотосъемочные системы»: метод. пособие для студентов высших учебных заведений для направления подготовки 23.03.03 / Севастьянова М.Н., Серебряков С.А. – М.: Изд. МИИГАиК, 2015. – 58 с.
6. Никитин В.Н., Семенцов А.В. Определение разрешающей способности фотоаппарата по наклонным снимкам с использованием радиальных мир // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1. № 4. С. 53–58.

7. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме ГКИНП (ОНТА) – 12 – 274 – 03. – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 36 с.
8. Blanc, P., Wald. L. A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors. Working paper – 2009.
9. Choi, T. IKONOS satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method. Master Thesis. South Dakota State University: Brookings, SD, USA, 2002.
10. Crespi, M., De Vendictis, L. A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment // *Sensors*. 2009. Vol. 9. No. 5. P. 3289–3313.
11. Helder, D., Choi, T., Rangaswamy, M. In-flight characterization of the spatial quality of Remote Sensing imaging systems using point spread function estimation. Post-Launch Calibration of Satellite Sensors. On-orbit MTF assessment of satellite cameras. 2004. Vol. 4. P. 157–170.
12. Joseph, G. Building Earth Observation Cameras. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2015. ISBN 978-1-4665-6647-7.
13. Miaozhong Xu, Ming Cong, Huijie Li. Research of on-orbit MTF measurement for the satellite sensors. Proc. SPIE 9158. Remote Sensing of the Environment: 18th National Symposium on Remote Sensing of China. 915809 (May 14, 2014). doi:10.1117/12.2064148.
14. Rangaswamy, M.K. QuickBird II two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array. Master Thesis. South Dakota State University: Brookings, SD, USA, 2003.
15. Schowengerdt, R.A., Colwell, J.E. Measurement of the HYDICE system MTF from flight imagery // *Proceeding of SPIE* 2821. 1996. P. 127–136.
16. Xianbin Li, Xiaoguang Jiang, Chuanjie Zhou, Caixia Gao, Xiaohuan Xi. An analysis of the knife-edge method for on-orbit MTF estimation of optical sensors // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. Vol. 31. Nos. 17–18. P. 4995–5010. doi:10.1080/01431161.2010.488254.