

Технологии определения характеристик целевой аппаратуры КК ДЗЗ

А. И. Бочарников¹, А. Г. Жиличкин², В. П. Коваленко³, А. В. Кондратов⁴,
В. В. Тихонычев⁵, А. В. Худяков⁶

¹заслуженный военный специалист, ^{2,3,5}к. т. н.,
Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы»
e-mail: validacia2010@ntsomz.ru

Аннотация. Рассмотрены основные технологии определения характеристик целевой аппаратуры (ЦА) видимого, инфракрасного и радиолокационного диапазонов. Отмечены особенности оборудования тестовых участков и состав тест-объектов, используемых для контроля пространственно-частотных, радиометрических и координатно-измерительных характеристик ЦА КК ДЗЗ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, характеристики целевой аппаратуры, разрешающая способность, линейное разрешение на местности

Techniques for Characterization of Remote Sensing Spacecraft Targeted Equipment

A. I. Bocharnikov¹, A. G. Zhilichkin², V. P. Kovalenko³, A. V. Kondratov⁴,
V. V. Tikhonychev⁵, A. V. Khudiakov⁶

¹Honored Military Specialist,
^{2,3,5}candidate of engineering science
Research Center for Earth Operative Monitoring JSC "Russian space systems"
e-mail: validacia2010@ntsomz.ru

Abstract. The main techniques for characterization of targeted visible, IR, and radar equipment are considered. The features of the test-site equipment and test-target composition used for monitoring the spatial frequency, radiometric, and coordinate measuring characteristics of remote sensing spacecraft targeted equipment are highlighted.

Key words: Earth remote sensing, characteristics of targeted equipment, resolution, linear resolution on ground

Введение

Целевая аппаратура (ЦА) космических комплексов (КК) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в процессе летных испытаний и штатной эксплуатации нуждается в подтверждении заявленных параметров качества как на этапе государственных испытаний, так и в реальных условиях орбитальной эксплуатации космических аппаратов. Без всестороннего оперативного контроля параметров ЦА и качества получаемых материалов космического наблюдения невозможно эффективное решение целевых задач дистанционного зондирования Земли.

Основные контролируемые характеристики ЦА КК ДЗЗ делятся на пространственно-частотные, радиометрические и координатно-измерительные.

К основным пространственно-частотным характеристикам ЦА КК ДЗЗ видимого и инфракрасного диапазонов относятся:

- функция передачи модуляции ЦА КК ДЗЗ;
- разрешающая способность в фокальной плоскости;
- линейное разрешение на местности.

К радиометрическим характеристикам относятся:

- точность измерения эффективной энергетической яркости (эффективной спектральной плотности энергетической яркости) (радиационной температуры для теплового диапазона) на входном зрачке ЦА;
- градационная характеристика;
- эквивалентная шумам разность яркостей (разность температур для теплового диапазона) и т. д.

К координатно-измерительным характеристикам относятся:

- ошибки внутренней геометрии снимков;
- точность координатной привязки изображений.

Контролируемые характеристики целевой аппаратуры радиолокационного (РЛ) диапазона несколько отличаются от характеристик ЦА видимого диапазона. В частности, к радиометрическим характеристикам ЦА РЛ диапазона относятся:

- динамический диапазон;
- радиометрическая чувствительность;
- радиометрическая точность и другие параметры.

Отличаются также используемые тест-объекты и способ оценивания пространственного разрешения ЦА радиолокационного диапазона.

Таким образом, технологии определения характеристик ЦА различны и зависят от рабочего диапазона ЦА (видимый, инфракрасный, радиолокационный), от типа оцениваемых характеристик (пространственно-частотные, радиометрические или координатно-измерительные), а также от разрешающей способности ЦА.

Рассмотрим технологии, особенности оборудования тестовых участков и состав тест-объектов, необходимый для определения и контроля характеристик ЦА видимого инфракрасного и радиолокационного диапазонов.

Технологии определения пространственно-частотных характеристик видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Определение пространственно-частотных характеристик ЦА КК ДЗЗ видимого и ближнего ИК-диапазона выполняется визуально, с использованием различных мир (штриховых, радиальных, секторных), либо инструментально с использованием тест-объектов типа «резкий край» и точечных источников излучения, например сферических зеркал.

Различные варианты изготовления тест-объектов для визуального дешифрирования показаны на рис. 1.

Порядок определения пространственно-частотных характеристик визуальным способом по штриховым мирам заключается в поиске минимальной группы штрихов, различаемой оператором.

Группа штрихов считается разрешаемой, если:

- можно сосчитать число штрихов;



Рис. 1. Варианты изготовления тест-объектов для визуального дешифрирования

- число штрихов группы в изображении мира совпадает с числом штрихов в мире;
- существует визуальное восприятие разницы в уровне серого тона на изображении между каждой светлой полосой и соседними с ней темной полосой или полосами на значительной части всей длины полосы.

Предельно разрешаемой группой штрихов считается та разрешаемая группа, до которой разрешаются все группы меньшей частоты того же направления. Ширина штриха в указанной группе мира отождествляется с величиной линейного разрешения на местности.

Для повышения объективности оценок линейное разрешение на местности окончательно вычисляется как среднее арифметическое значение ширины штрихов, соответствующих предельно разрешаемым группам, определенных операторами дешифровщиками.

При использовании радиальных или секторных мир линейное разрешение на местности выполняется путем измерения полного диаметра (или радиуса) мира и размера зоны размытия (рис. 2).

Расчет линейного разрешения на местности выполняется по формуле:

$$L = r/R \cdot d,$$

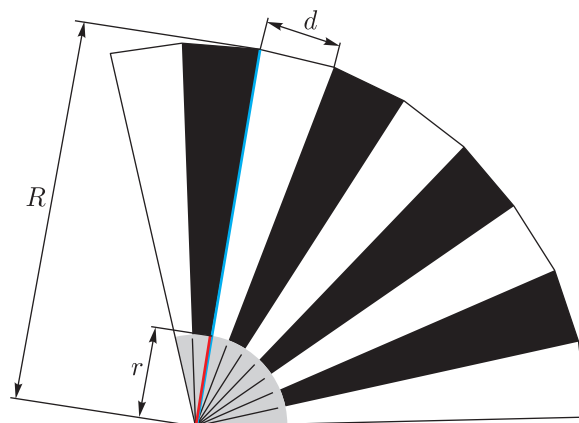


Рис. 2. Определение ЛРМ по секторной радиальной мире

где L — искомое линейное разрешение на местности, м;

R — полный наблюдаемый на изображении диаметр (или радиус) мира;

r — диаметр (или радиус) пятна размытия в центре мира;

d — фактическая длина основания сектора мира, м.

Измерение размеров R и r может выполняться как в миллиметрах, так и в пикселях изображения на мониторе компьютера.

Технология визуального определения линейного разрешения на местности реализует метод пря-



Рис. 3. Фрагмент изображения с тест-объектами типа «резкий край»

мых измерений в реальных условиях применения и считается наиболее простым и понятным способом оценивания пространственно-частотных характеристик космических систем наблюдения. Технология не требует наличия каких-либо специальных средств и дополнительного программного обеспечения, кроме средств визуализации цифровых изображений.

С развитием вычислительной техники широкое применение находит инструментальный метод оценивания ЛРМ с использованием линейно-протяженных объектов и тест-объектов типа «резкий край». Суть метода заключается в анализе отображения переходной характеристики, возникающей на участках с резким перепадом яркости («резком крае»). Идеальным «резким краем» считается перепад яркости, в котором ширина границы перехода яркости составляет не более 10 % от проекции пикселя на земной поверхности. Примеры резких краев показаны на рис. 3.

Порядок инструментальной оценки пространственно-частотных характеристик предполагает последовательное выполнение следующих операций [1]:

- определение функции передачи модуляции;
- определение светосигнальной характеристики;

- определение шумовой характеристики;
- оценка разрешающей способности в фокальной плоскости;
- оценка линейного разрешения на местности.

Форма функции передачи модуляции восстанавливается по форме «резкого края» (переходной характеристике) (рис. 4).

По ФРЛ рассчитывается функция передачи модуляции (ФПМ). Разрешающая способность ЦА КК ДЗЗ определяется как точка пересечения ФПМ и некоторой пороговой характеристики, наклон которой зависит от уровня шума изображения, заданного контраста и других характеристик ЦА (см. рис. 5).

Результаты оценивания разрешающей способности и линейного разрешения на местности для отчетности оформляются в виде табл. 1 и 2.

Соответствующее программное обеспечение разработано и используется в комплексах оценки качества материалов съемки КК ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Канопус-В», а также в системе валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), разрабатываемой в рамках ОКР «Регион-В-Валидация-РК».

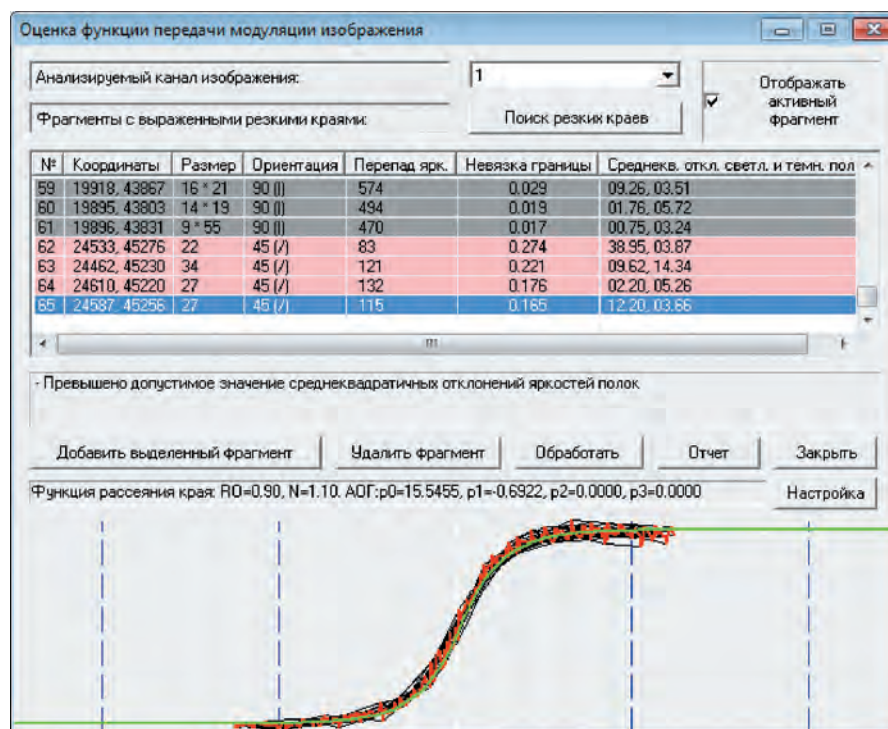


Рис. 4. Форма переходной функции

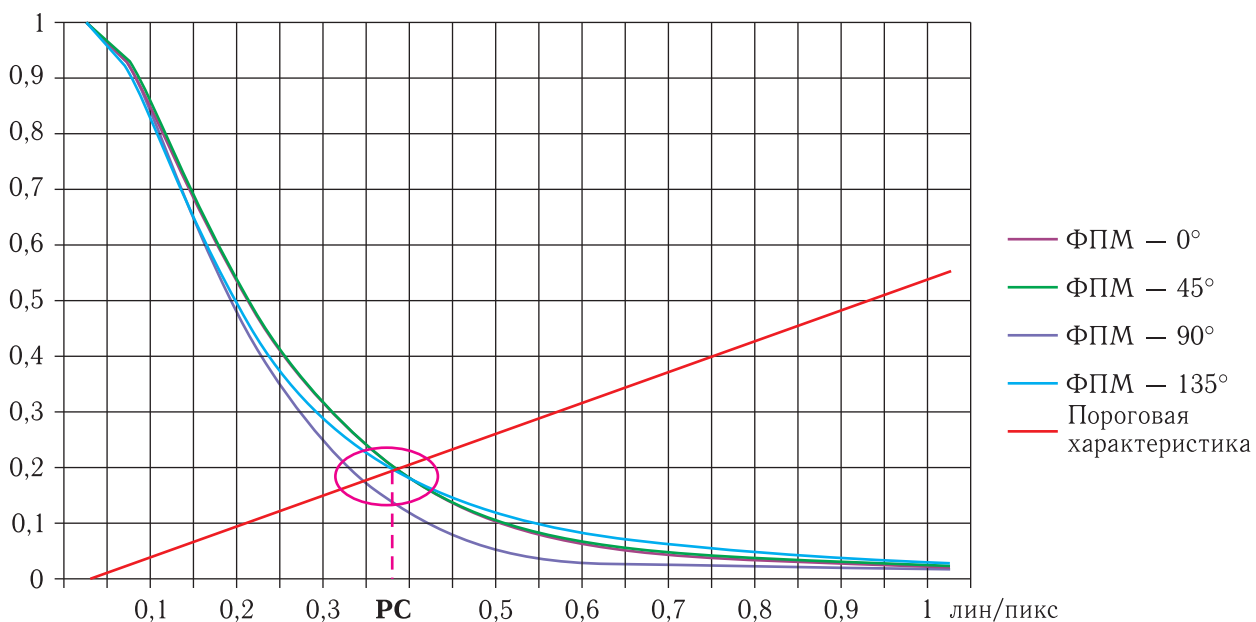


Рис. 5. Оценка разрешающей способности графическим способом

К достоинствам инструментальной оценки можно отнести следующее.

1. Такая оценка не требует наличия специально подготовленных тест-объектов.
2. Тест-объекты типа «резкие края» можно обнаружить практически на любых снимках, содержащих районы с высоким уровнем антропогенной деятельности: города, аэродромы, промышленная и транспортная инфраструктура.

Таблица 1. Результаты оценивания разрешающей способности изображения

Значение разрешающей способности по направлению 0, лин/пикс	0,34
Значение разрешающей способности по направлению 45, лин/пикс	0,35
Значение разрешающей способности по направлению 90, лин/пикс	0,32
Значение разрешающей способности по направлению 135, лин/пикс	0,34
Среднее значение разрешающей способности	0,34

Таблица 2. Результаты оценивания ЛРМ в реальных условиях наблюдения

Значение линейного разрешения на местности по направлению 0°, м	0,99
Значение линейного разрешения на местности по направлению 45°, м	0,96
Значение линейного разрешения на местности по направлению 90°, м	1,06
Значение линейного разрешения на местности по направлению 135°, м	0,99
Среднее значение линейного разрешения на местности, м	1,00

3. Отсутствует необходимость использования субъективных критериев визуального дешифрирования, что повышает достоверность оценки характеристик.

Технологии определения радиометрических характеристик ЦА видимого и инфракрасного диапазона

Для оценки радиометрических характеристик оптико-электронной ЦА в качестве тестовых объектов используются искусственные либо естественные поля яркости.

Искусственные поля яркости применяются для ЦА высокого и сверхвысокого разрешения. Как показала практика работы с площадными тестовыми объектами для ЦА видимого диапазона, от двух

до трех пикселей в обе стороны от границы тестового объекта уходит на краевую переходную функцию изображения, поэтому тестовые объекты должны иметь стабильные параметры излучения в пределах квадрата со стороной 10–12 проекций пикселя. В этом случае для корректных статистических оценок остается от 16 до 64 пикселей практически неискаженного переходной функцией изображения. Так, для оценки радиометрических характеристик мультиспектральных каналов аппаратуры «Геотон-Л1» применялись искусственные белое и темное поля размером $30 \times 30 \text{ м}^2$ (рис. 6).

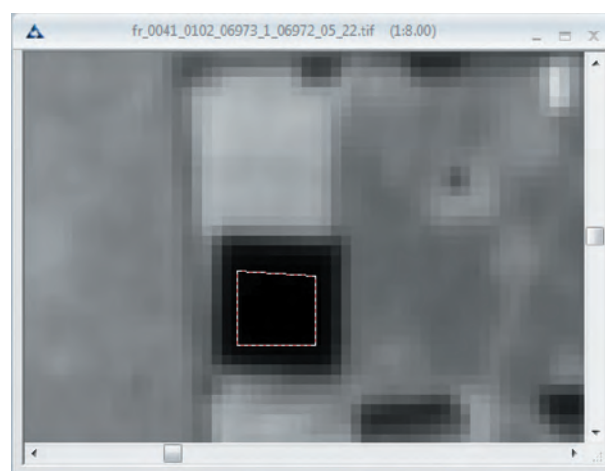
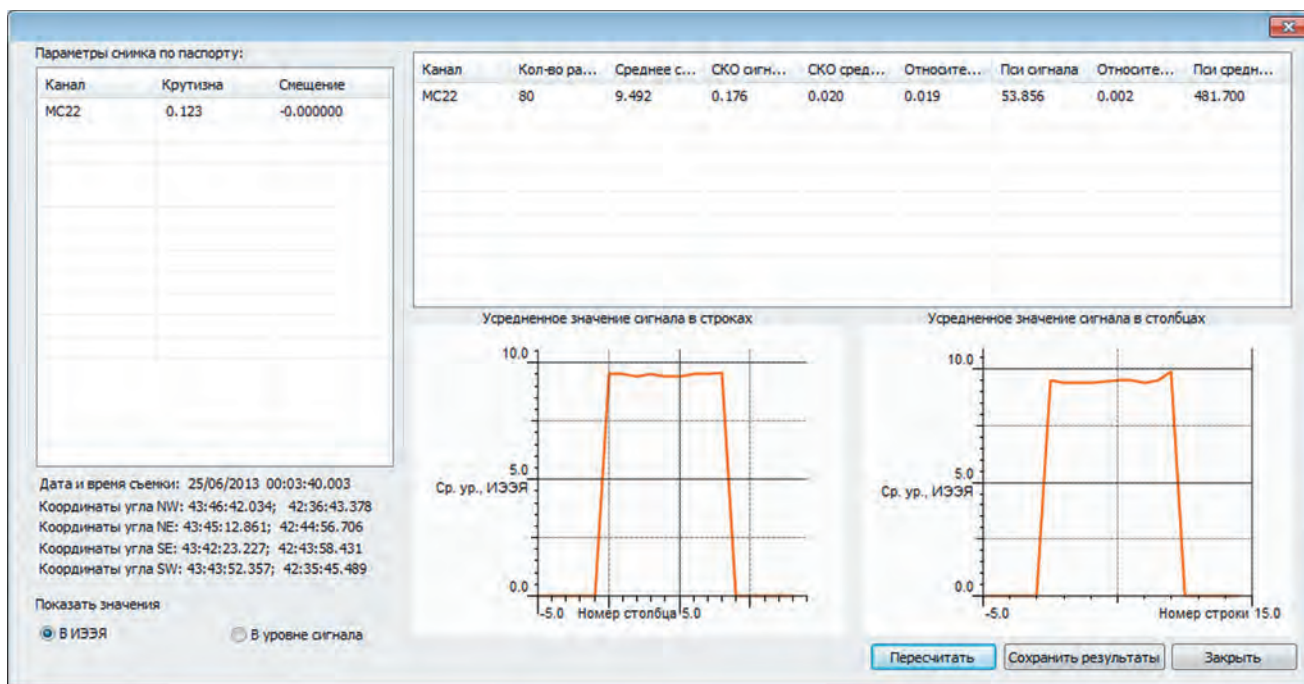


Рис. 6. Изображение искусственных тестовых объектов

Красно-белым пунктиром выделена область практически неискаженного переходной функцией изображения темного тестового объекта

В паспорте маршрута каждого канала приводятся параметры его градиационной характеристики, позволяющие выполнить пересчет уровней яркости в эффективную энергетическую яркость L_{vi} на входном зрачке ЦА. На рис. 7 приведены слева — идентификатор канала и параметры обратной градиационной характеристики.

На графиках внизу справа изображены средние значения эффективной яркости по столбцам и по строкам. В верхней таблице — результаты расчета среднего значения эффективной яркости, СКО эффективной яркости и СКО ее среднего значения. Как видно из левого графика, левая граница выбранной области захватывает часть переходной функции края.

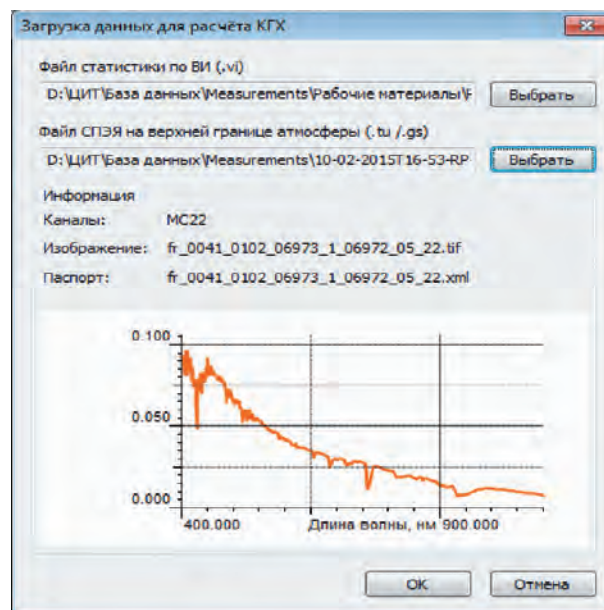
Рис. 7. Результаты расчетов L_{vi}

В интервале времени, охватывающем момент съемки тестового участка, выполняются измерения спектральных коэффициентов отражения тестовых объектов, освещенности местности, съемка небосвода (для учета влияния облачности) и параметров атмосферы, позволяющих рассчитать оптические характеристики атмосферы и спектральные плотности яркостей (СПЭЯ) $L_{\lambda to}$ тестовых объектов, приведенные к входному зрачку ЦА. На рис. 8 изображен график СПЭЯ темного поля.

В результате интегрирования произведений СПЭЯ и спектральных характеристик чувствительности каналов ЦА по длинам волн вычисляется «эталонное» значение эффективной энергетической яркости L_{to} тестовых объектов.

При наличии искусственных объектов на одном маршруте можно получить три тестовых объекта (в качестве третьего используется трава). Полученные результаты сравниваются, набирается статистика, по которой делается вывод о соответствии ЦА требованиям ТЗ по точности радиометрических измерений (рис. 9).

При использовании естественных объектов, например, рекомендованных CEOS для радиометрических измерений, необходимо получить пара-

Рис. 8. СПЭЯ темного поля, Вт/(м²·мкм),
длина волны, нм

метры атмосферы на момент съемки и результаты измерения коэффициентов спектральной яркости тестовых объектов. Для расчета L_{to} применяется либо MODTRAN, либо 6C, либо MCC++.

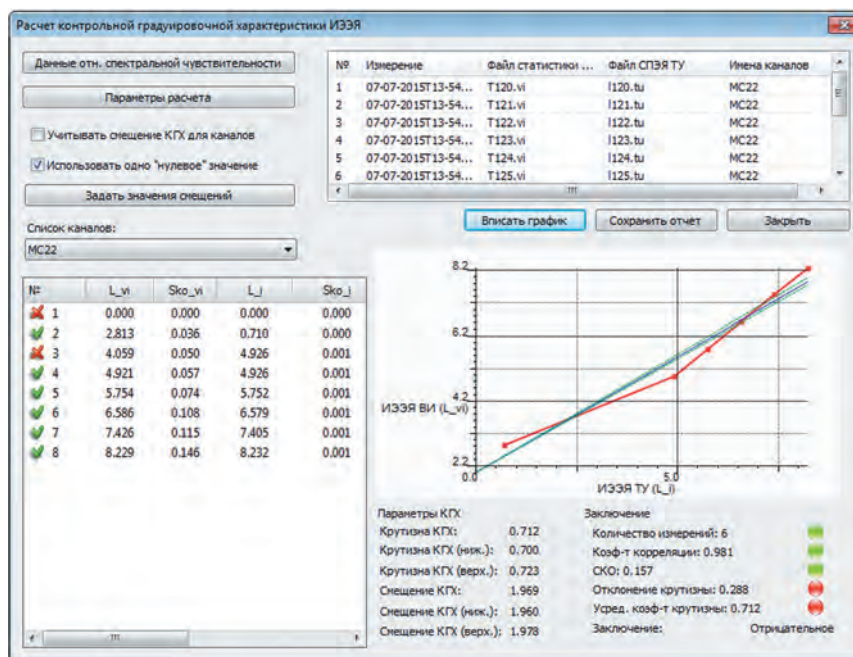


Рис. 9. Результаты оценки точности измерения эффективной энергетической яркости по смоделированным тестовым объектам

В этом случае обычно получают один тестовый объект на маршрут.

Обработка результатов съемки аналогична описанной выше.

Особенности контроля радиометрических характеристик ИК-систем ДЗЗ

В большинстве случаев в качестве выходного сигнала ИК-систем ДЗЗ используется радиационная температура — температура черного тела, обеспечивающая данный код яркости изображения. В этом случае градуировочная характеристика системы — зависимость уровня яркости изображения от радиационной температуры.

Важной особенностью контроля ЦА ИК-диапазона является зависимость уровня яркости от коэффициента излучения $\epsilon_{\text{то}}(\lambda, T)$ тестового объекта, в результате чего радиационная температура T_p может ощутимо отличаться от термодинамической T , измеряемой контактным методом. Кроме того, в диапазоне 3–5 мкм существенный вклад в излучение объекта в дневное время вносит отраженная солнечная составляющая. Следует

отметить, что атмосфера изменяет прошедший через нее спектр излучения объектов.

Поэтому при контроле радиометрических характеристик ИК-систем ДЗЗ применяется как похожий на описанный выше подход, так и подход, опирающийся на метод интеркалибровки.

В первом случае по наземным измерениям спектральных характеристик тестового объекта, характеристике спектральной чувствительности канала ЦА, градуировочной характеристике канала и СПЭЯ на входном зрачке ЦА рассчитывается радиационная температура тестового объекта, которая и сравнивается с радиационной температурой, определенной по уровням яркости.

Во втором случае реализуется сравнение радиационной температуры тестового объекта с результатами измерений температуры этого объекта аналогичной ИК-аппаратурой ДЗЗ, прошедшей аттестацию.

В настоящее время применяются, в основном, ИК-системы ДЗЗ среднего разрешения, размер проекции пикселя которых составляет десятки метров, и при линейном размере 10–12 проекций пикселя площадь искусственного тестового объекта оказывается внушительной. Создание

и эксплуатация искусственных тестовых объектов больших размеров с высокой точностью поддержания постоянства температуры (либо СПЭЯ) по площади такого объекта задача весьма затратная, поэтому для контроля применяются в основном естественные объекты.

Как известно, водоемы являются объектами с минимальной пространственной изменчивостью и в полной мере подходят в качестве таких объектов. Кроме того, коэффициент излучения воды в ИК-диапазоне близок к единице. Поэтому в качестве температурного полигона используют участки морской поверхности с данными судовых измерений и метеорологических буев. Эту информацию можно получить по общедоступным каналам связи, например, по Интернету.

Метеорологические буи имеют известные геодезические координаты и температурные измерения, привязанные ко времени. Такая система метеорологических буев организована в ряде зарубежных стран, в России она может быть налажена.

В качестве варианта температурного полигона могут использоваться водоемы, расположенные на территории России. Главным требованием к ним является отсутствие сточных вод от предприятий, приводящих к пространственно-температурной неоднородности, и ближайших температурных источников, приводящих к неравномерному по температуре атмосферному полю.

Также в качестве тестовых объектов выбираются естественные объекты с плавно изменяющимися по площади характеристиками излучения, например, песчаные поверхности и др.

По таким измерениям можно проконтролировать градационную характеристику (зависимость уровня яркости видеоизображения от температуры либо от энергетической яркости тестового объекта), а также точность измерения радиационной температуры.

Для оценки пороговой (эквивалентной шуму) изображения протяженного равномерного объекта заданной температуры и коэффициента излучения) разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$ применяется следующий метод.

Принимается, что собственная автокорреляционная функция отобранных тестовых объектов характеризуется значительным радиусом корреляции,

в то время как шум ИК-системы ДЗЗ можно принять дискретным белым шумом.

По видеоинформации оцениваются параметры автокорреляционной функции тестового полигона и выделяется СКО белого шума ИК-системы ДЗЗ, по величине которого и обратной градационной характеристике канала и вычисляется $\Delta T_{\text{пор}}$.

Технологии определения пространственных и радиометрических характеристик ЦА радиолокационного диапазона

Основными метрологическими средствами, входящими в комплекты мерительных тест-объектов для определения характеристик ЦА РЛ-диапазона, являются пассивные и активные радиолокационные отражатели (РЛО). В качестве РЛО могут применяться следующие типы отражателей:

- плоские пластины;
- сферы;
- угловые отражатели;
- цилиндрические отражатели с плоскими основаниями;
- линзы Люнеберга;
- активные отражатели;
- станции активного контроля.

Для оборудования радиолокационных полигонов используются в основном пассивные угловые отражатели (УО) с треугольными, реже с квадратными гранями. Реже применяются Линзы Люнеберга, активные отражатели и станции активного контроля (САК) из-за сложности и дороговизны изготовления. На рис. 10 изображен вид пассивных отражателей и станции активного контроля для определения характеристик ЦА РЛ-диапазона.

Из радиолокационных отражателей формируют проверочные миры. Так, проверочная мира для оценки пространственного разрешения составляется из 9 УО с треугольными гранями, располагаемых на местности квадратом в три ряда по три УО. Одна из диагоналей квадрата расположена перпендикулярно к маршруту полета КА (рис. 11),

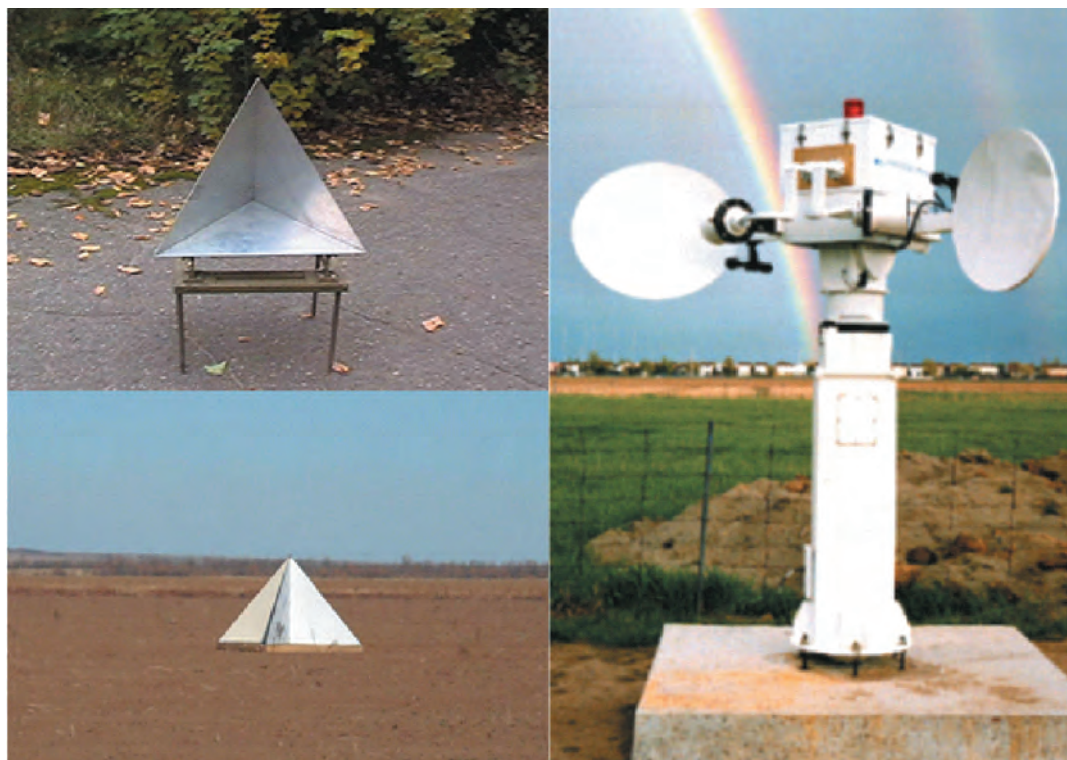


Рис. 10. Вид пассивных отражателей и станции активного контроля для определения характеристик ЦА РЛ-диапазона

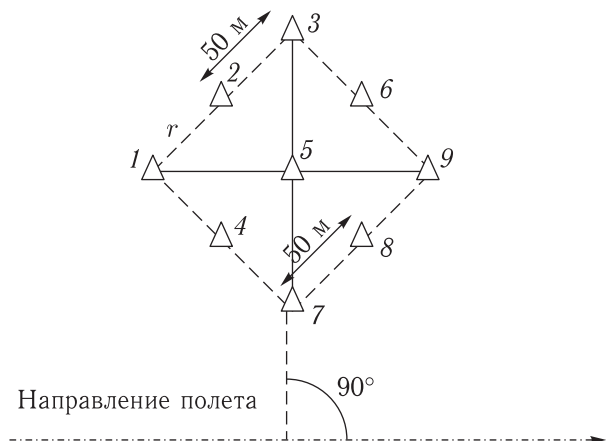


Рис. 11. Расположение уголкового отражателей в мире оценки пространственного разрешения

для того чтобы избежать влияния боковых лепестков на отклики соседних отражателей.

Размеры УО, размещенных в комплекте пространственной миры, выбираются таким образом, чтобы обеспечить превышение эффективной поверхности отражения (ЭПР) на 40 дБ выше фона

местности $-25-30$ дБ/м² (асфальт, бетон, низкая сухая трава).

Расстояние между УО выбирается одинаковым. Такое расстояние исключает влияние соседних УО друг на друга за счет взаимных помех, вызываемых боковыми лепестками импульсных откликов. Кроме того, эти расстояния играют важную роль при оценке геометрических искажений радиолокационного изображения (РЛИ).

По полученному РЛ-изображению для каждого отражателя (рис. 12) восстанавливается вид функций рассеяния точки, а затем усредняется по всем реализациям (рис. 13).

В отличие от технологии определения пространственно-частотных характеристик ЦА видимого диапазона, в радиолокационном диапазоне пространственное решение определяется непосредственно по форме ФРТ без перехода в частотную область и вычисления функции передачи модуляции. Пространственное разрешение ЦА РЛ-диапазона принимается равной ширине нормированной функции рассеяния точки по уровню 0,5 от максимума



Рис. 12. Фрагменты модельного изображения РЛО

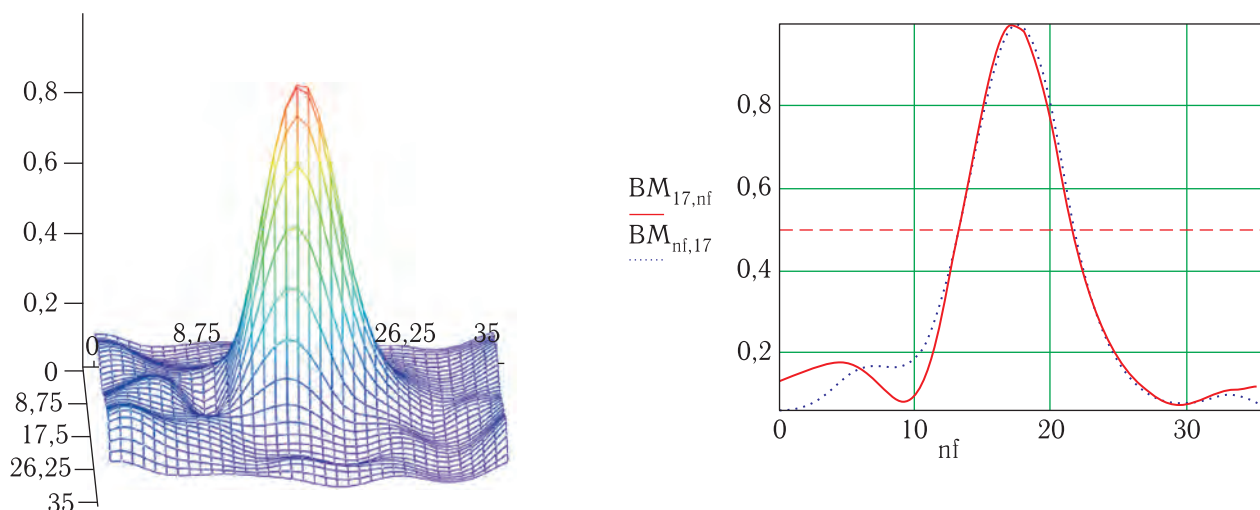


Рис. 13. Восстановленная форма ФРТ

в случае, если яркость изображения соответствует мощности сигнала, или по уровню 0,707, если яркость изображения соответствует амплитуде принятого сигнала [2].

Для определения радиометрических характеристик используется так называемая потенциальная мира. В состав такой мира входят по меньшей мере 12 трехгранных уголкового отражателей, величины ЭПР которых линейно возрастают равными долями по 5 дБ от наименьшей ЭПР до наибольшей.

Комплект мира должен быть расположен под углом 45° к линии пути КА (рис. 14).

Расстояние между отдельными УО должно находиться в пределах 30–50 м в зависимости от величины однородной площадки, на которой расположены уголкового отражатели. Оси, проходящие через максимумы диаграммы направленности УО, должны быть перпендикулярны линии пути КА.

Размеры УО, оптимизированные для ЦА с рабочей длиной волны 3 и 10 см, показаны в табл. 3.

На рис. 15 приведен вариант совместного размещения пространственной и потенциальной мир на радиолокационном полигоне.

Определение радиометрических характеристик выполняется по специальным методикам, изложенным в соответствующей литературе.

Технология определения координатно-измерительных характеристик ЦА видимого, инфракрасного и радиолокационного диапазонов

Для оценки координатно-измерительных характеристик материалов съемки КК ДЗЗ предварительно должен быть разработан комплект координатных тестовых участков и специальное программное обеспечение.

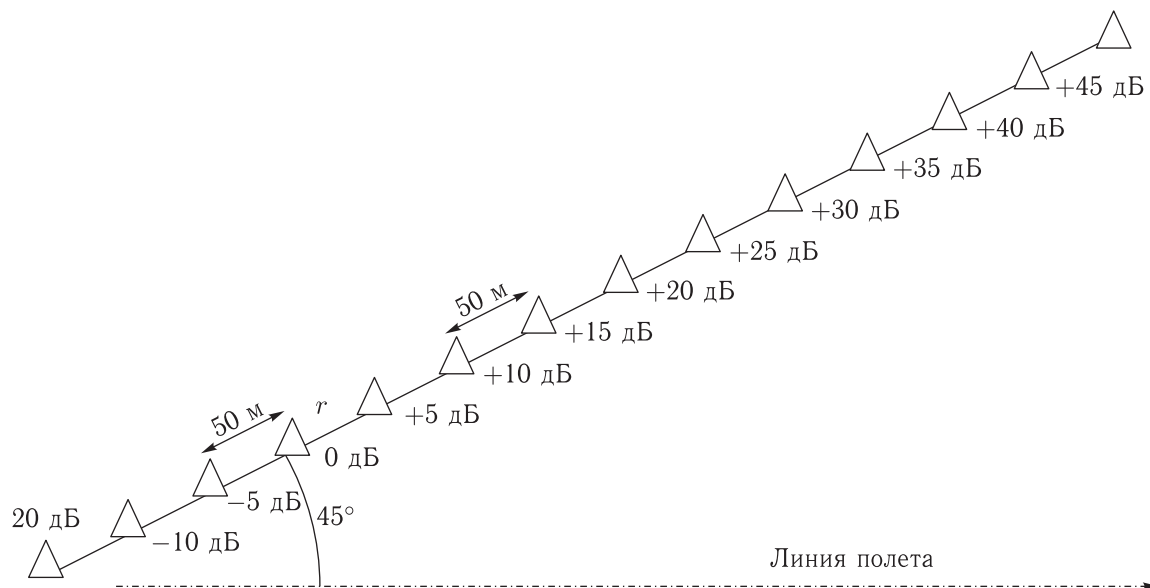


Рис. 14. Внешний вид потенциальной миры для определения радиометрических характеристик ЦА РЛД

Таблица 3. Размеры УО потенциальной миры

№ УО	Длина внутреннего ребра, см	Рабочая длина волны 3 см		Рабочая длина волны 10 см	
		ЭПО		ЭПО	
		м ²	дБ	м ²	дБ
1	6,8	0,1	-10	0,036	-20,0
2	9,1	0,32	-5	0,115	-15,6
3	12,1	1	0	0,36	-10,6
4	16,1	3,16	5	1,13	-5,6
5	21,5	10,0	10	3,6	-0,9
6	28,7	31,6	15	11,36	4,7
7	38,3	100	20	36,05	9,5
8	51,1	316	25	114,2	14,5
9	68,1	1000,0	30	360,2	19,5
10	90,8	3162	35	1138,9	24,5
11	121,1	10 000	40	3605,6	29,5
12	161,5	31 623	45	11 398,8	34,5
13	215,3	100 000	50	36 003,6	39,5

В рамках ОКР «Регион-В-Валидация-РК» подготовлено три комплекта координатных тестовых участков, которые включают опорные точки Московского, Пятигорского, и Иркутского тестовых участков для оценки координатно-измерительных характеристик ЦА видимого, инфракрасного и ра-

диолокационного диапазонов. Обзорная схема расположения опорных точек Московского тестового участка изображена на рис. 16.

Тестовые участки состоят из наборов данных, содержащих изображения, описания, геодезические координаты (в системе координат проекции

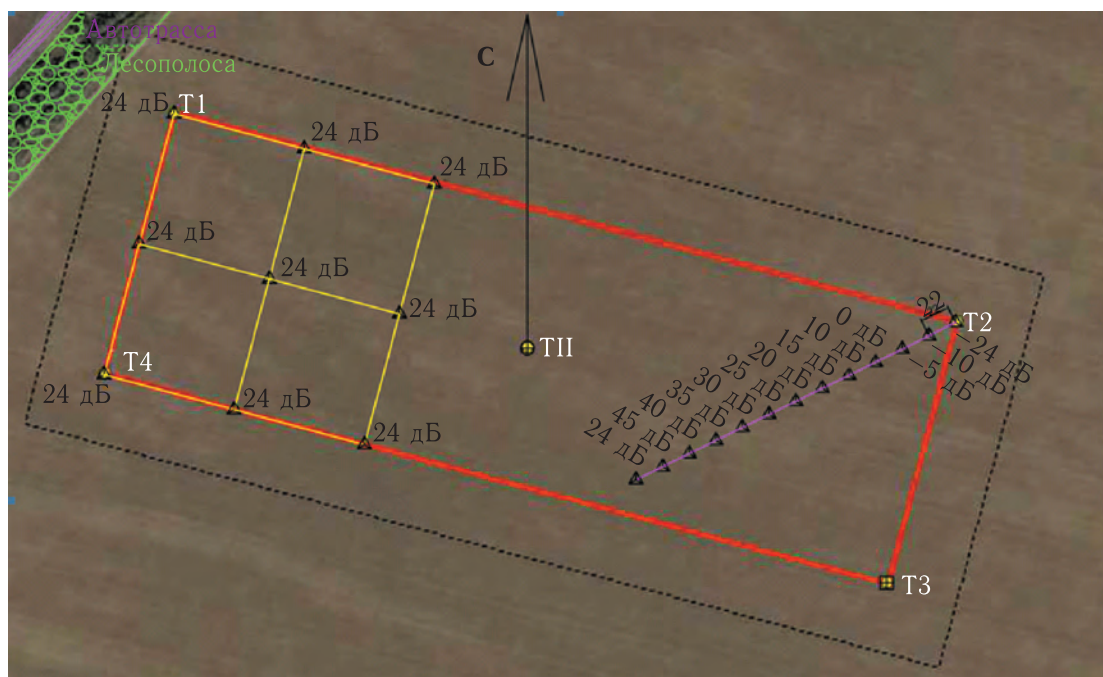


Рис. 15. Вариант размещения пространственной и потенциальной мир на радиолокационном полигоне

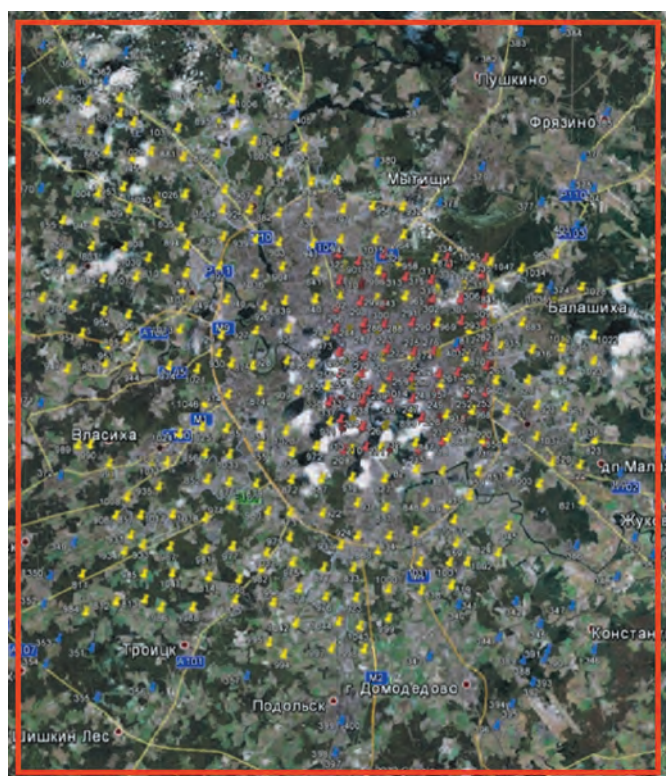


Рис. 16. Обзорная схема расположения опорных точек
Московского тестового участка (изображение с сервера
Google Earth)

UTM на общеземном эллипсоиде WGS-84) опорных точек местности (ОТМ) в комплекте с их цифровыми абрисами.

Цифровые абрисы ОТМ представляют собой геопривязанные изображения участка местности с опорной точкой местности строго в центре изображения.

Цифровые абрисы ОТМ видимого диапазона разработаны из космических или аэрофотоизображений видимого диапазона электромагнитного спектра, радиолокационного диапазона — из космических изображений радиолокационного диапазона, инфракрасного диапазона — из космических изображений инфракрасного диапазона электромагнитного спектра.

Образец цифрового абриса представлен на рис. 17.

Специальное программное обеспечение (СПО) содержит:

- программный комплекс контроля координатно-измерительных характеристик КК ДЗЗ видимого, инфракрасного и радиолокационного диапазонов, проверки их соответствия требованиям ТТЗ и подготовки данных для фотограмметрической калибровки (ПК КВИР);

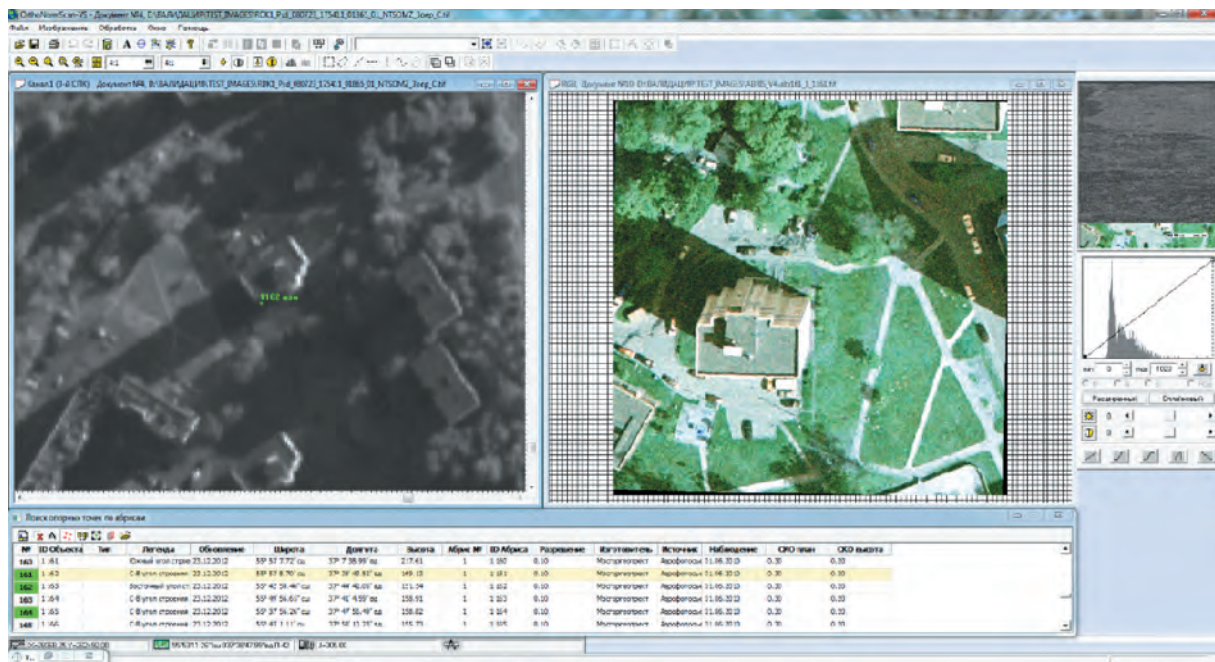


Рис. 17. Тестируемое изображение и детальный цифровой абрис опорной точки

- программный комплекс каталогизации опорных точек местности (ПК Каталог ОТМ);
- локальную базу данных опорных точек местности (ЛБД ОТМ).

ПК Каталог ОТМ производит заполнение и корректировку ЛБД ОТМ, отбор из ЛБД ОТМ необходимых для оценки конкретного изображения ОТМ и передачу данных о них в ПК КВИР, который производит:

- открытие и визуализацию геопривязанных материалов космического ДЗЗ в формате GeoTIFF или IMG;
- определение (измерение) координат опорных точек местности (ОТМ) на геопривязанных изображениях по их абрисам в режиме использования коррелятора и интерактивном режиме (рис. 17);
- определение расхождений (далее невязок) пространственных координат между измеренными значениями координат опорных точек на геопривязанном изображении и истинными (измеренными на местности) значениями координат опорных точек;

- расчет (по значениям невязок) средней квадратичной ошибки геодезической привязки изображения (СКО), СКО взаимного положения контуров, величины систематического смещения изображения и значений круговых ошибок СЕ90 и СЕ95;

- формирование паспорта оценки координатно-измерительных характеристик космического изображения.

Разработанное СПО позволяет оценить точность геопривязки изображений как по классическому отечественному принципу расчет СКО, так и по европейскому принципу расчет круговых ошибок СЕ90 и СЕ95. Таким образом, имеется возможность производить сравнительный анализ отечественных и зарубежных материалов космической съемки.

Список литературы

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. Под ред. В. В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
2. Радиолокационные системы, дешифрирование радиолокационных изображений. Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008.