

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРОЕКЦИИ ПИКСЕЛЯ СЪЁМОЧНЫХ СИСТЕМ МСУ-МР И КМСС НА МЕСТНОСТЬ

И.Г. Симановский, Е.А. Зеленин, Л.Е. Черненко
П.Г. Михайлюкова, Б.В. Райченко

Статья посвящена разработке расчётной и экспериментальной (по снимкам) методик оценки величины проекции пикселя МСУ-МР и КМСС на местность в направлении, совпадающем с направлением полёта космического аппарата и перпендикулярном ему. Предлагается рассчитывать значения наземного интервала дискретизации GSI и мгновенного поля обзора $GIFOV$ при помощи известных геометрических параметров съёмочной системы и данных бортового синхронизирующего координатно-временного устройства, а экспериментальные результаты получать построением яркостных профилей, пересекающих на снимке стабильные объекты с контрастными границами (например, острова), последующей математической обработкой и сопоставлением с истинным размером объектов, определяемым из баз геопространственных данных. Для обеих методик приведены основные формулы и алгоритмы. Исследованы зависимости проекции пикселя от угла сканирования и от номера пикселя в строке. Учтено влияние на величину проекции пикселя крена и тангажа. Приведены результаты апробации описанных методик по снимкам МСУ-МР и КМСС, полученным с КА «Метеор-М» №2. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных результатов вычисления величины проекции пикселя на местность, отмечено их хорошее согласие.

Ключевые слова: Метеор-М, дистанционное зондирование Земли, МСУ-МР, КМСС, проекция пикселя, пространственное решение, интервал дискретизации, поле обзора, крен, линейный сканер, продольный ПЗС-сканер спутниковые изображения.

Введение

Оптические устройства (ОУ) для получения изображений подстилающей поверхности, установленные на российских гидрометеорологических космических аппаратах (КА) «Метеор-М» №1 и «Метеор-М» № 2, Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР) и Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения (КМСС) находят применение в широком спектре прикладных задач, связанных, с физикой атмосферы [1 – 3]. Важной характеристикой снимков, полученных при помощи ОУ, является проекция пикселя на местность. Эта величина заметно изменяется при удалении от надира снимка к его краям, различается в продольном и поперечном полёту КА направлениях, и, что особенно существенно, может меняться с течением времени, так как зависит от актуальной ориентации КА в пространстве. Для её мониторинга предлагается параллельно использовать две методики: расчётную и экспериментальную. Расчётная методика зависит от данных, которые получают при помощи бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ), и может использоваться для быстрой оценки величины проекции пикселя на местность для всех пикселей изображения, полученного ОУ. Следует отметить, что часть формул, используемых в расчётных методиках, будет отличаться в зависимости от рассматриваемого ОУ. Экспериментальная методика основана на анализе изображений, получаемых ОУ, и может быть полезна как в условиях недоступности данных от БСКВУ, так и для своевременного обнаружения ошибок определения параметров ориентации КА.

Расчётная методика

Проекция пикселя на местность определяется наземным интервалом дискретизации GSI (Ground-projected Sample Interval) и мгновенным полем обзора $GIFOV$ (Ground Instantaneous Field of View). При этом, если для продольного ПЗС-сканера, которым является КМСС, величины GSI и $GIFOV$ в направлении, поперечном движению КА, совпадают, то для линейного сканера (МСУ-МР) они в общем случае будут различаться [4]. Различия в геометрии съёмки МСУ-МР и КМСС показаны на рис. 1.

Величина $GIFOV$ зависит от мгновенного угла обзора пикселя $IFOV$ и пропорциональна разности геоцентрических углов на границах поля обзора пикселя n :

$$GIFOV_n^{nonep} = R[\varphi(\theta_n + w/2f) - \varphi(\theta_n - w/2f)], \quad (1.1)$$

$$[GSI]_n^{nonep} = GIFOV_n^{nonep} = R[\varphi_{n+1} - \varphi_n], \quad (1.2)$$

где формула (1.1) применяется для МСУ-МР, а формула (1.2) для КМСС; R – радиус Земли; f – фокусное расстояние оптической системы; w – размер чувствительного элемента фотоприёмника; θ_n – угол сканирования (угол съёмки); φ_n – геоцентрический угол, соответствующий пикселю n . Углы отсчитываются от надира. Следует отметить, что для КМСС величина n соответствует номеру *границы* элемента ПЗС, отсчитываемой от края ПЗС-линейки (рис. 1, *a*), в то время как для МСУ-МР величина n соответствует *центру* соответствующего пикселя.

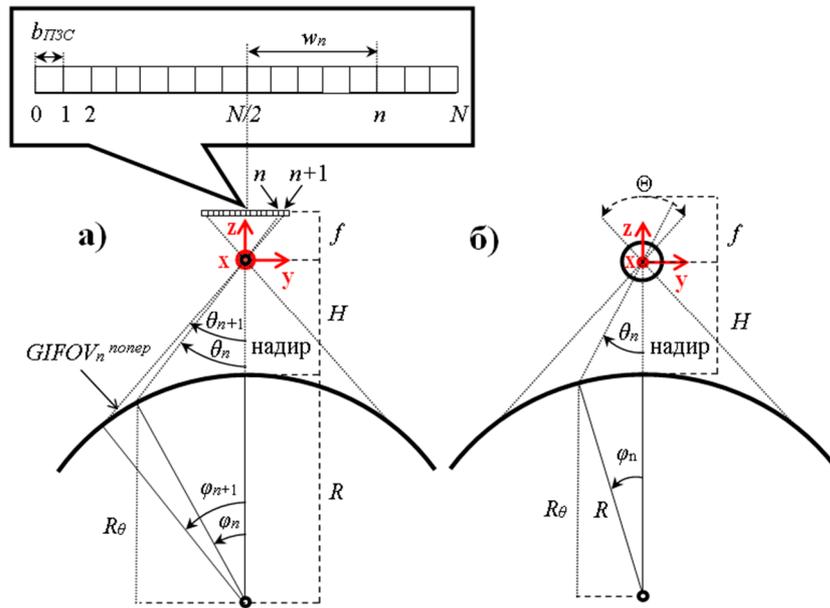


Рис. 1. Геометрические параметры съёмки КМСС (а) и МСУ-МР (б) поперёк движения КА (оптическая ось направлена в надир)

Согласно [5] геоцентрический угол равен

$$\varphi_n = \arcsin[(R + H) \sin \theta_n / R] - \theta_n, \quad (2)$$

где H – расстояние прибора от Земли.

В случае МСУ-МР GSI будет изменяться в направлении поперечном движению КА по формуле для линейного сканера (согласно [4]):

$$GSI(\theta_n)^{нопер} = \frac{GSI_{надир}^{нопер}}{H} \frac{H + R(1 - \cos \varphi_n)}{\cos(\theta_n) \cos(\theta_n + \varphi_n)}, \quad (3)$$

где $GSI_{надир}^{нопер}$ – наземный интервал дискретизации в надире:

$$GSI_{надир}^{нопер} = H \omega / \nu_\delta = H \Theta / N, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость сканирующего зеркала; ν_δ – частота дискретизации; Θ – полный угол обзора оптической системы; N – количество пикселей в строке.

Проекция пикселя на местность вдоль движения КА в надире $GSI_{надир}^{прод}$ определяется скоростью движения подспутниковой точки V и частотой

формирования строк изображения ν (существенно различающейся для МСУ-МР и КМСС):

$$GSI_{надир}^{прод} = V / \nu = 2\pi R / T\nu, \quad (5)$$

где T – период обращения КА.

Величина $GSI^{прод}$ также будет зависеть от угла съёмки θ_n , уменьшаясь при его увеличении. Это связано с уменьшением радиуса окружности R_θ (рис. 1), по которой движется точка, соответствующая углу θ_n , по сравнению с радиусом Земли в надире R .

При съёмке вдоль направления движения КА всем пикселям строки соответствует геоцентрический угол поворота $\varphi_{прод}$ (рис. 2, а). Зависимость $GSI^{прод}$ от угла сканирования для МСУ-МР и КМСС определяется формулой (4):

$$GSI_{\theta_n}^{прод} = GSI_{надир}^{прод} (R_\theta / R) = 2\pi R \cos \varphi_n / T\nu, \quad (6)$$

где φ_n – геоцентрический угол, соответствующий углу θ_n и определяемый формулой (2).

Следует учитывать, что для разных спектральных каналов МСУ-МР значения $GSI^{нопер}$ одинаковы, а $GIFOV^{нопер}$ различаются. Это связано с разными фокусными расстояниями объективов и размерами чувствительных элементов фотоприёмников.

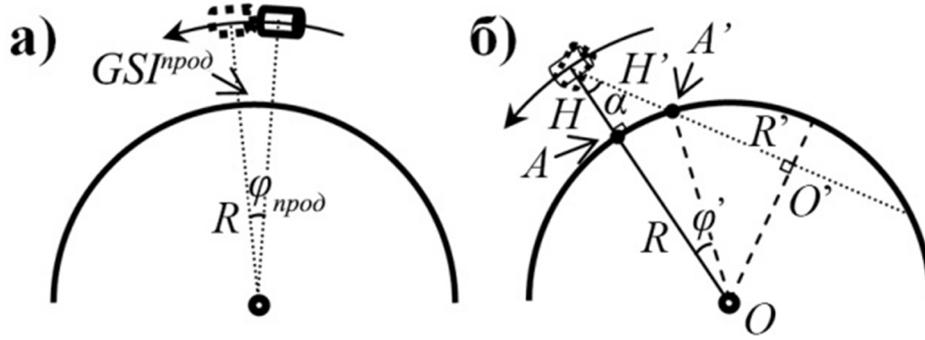


Рис. 2. Геометрические параметры съёмки КМСС и МСУ-МР вдоль движения КА (а); влияние тангажа на геометрию съёмки (б)

На величину проекции пикселя могут существенно влиять явления крена и тангажа КА, которые вызывают несовпадение оси симметрии оптической системы прибора с осью надира и вносят поправки в величины, вычисляемые по формулам (1) – (4), (6).

Креном называется поворот ОУ вокруг оси x на рис. 1. С учётом крена углы сканирования θ_n для МСУ-МР будут определяться формулой:

$$\theta_n = \Theta[(n-0,5) / N-0,5] + \psi, \quad n=1,2,\dots,N, \quad (7.1)$$

а для КМСС формулой

$$\theta_n = \arctg \frac{w_n}{f} + \psi; \quad n=1,2,\dots,N, \quad (7.2)$$

где ψ – угол крена (в радианах), знак которого выбирается в зависимости от направления вращения, а w_n – отстояние границы элемента ПЗС n от оптической оси (центра ПЗС-линейки), определяемое формулой:

$$w_n = \left[n - \frac{N}{2} \right] b_{\text{ПЗС}}, \quad (8)$$

где $b_{\text{ПЗС}}$ – размер элемента ПЗС, а N – количество элементов в линейке ПЗС.

Камеры МСУ-100 КМСС в плоскости, перпендикулярной полёту КА, устанавливаются под углом β , по модулю приблизительно равным 14° [3]. В формуле (7.2) это приведёт к постоянному вкладу в полный угол крена ψ , равному величине β .

Крен будет приводить к асимметрии зависимости GSI и $GIFOV$ от угла сканирования, а также к смещению положения надирного пикселя от центра строки. Полагая $\theta_n = 0$ из формул (7.1), (7.2) и (8), легко получить для положения надирного пикселя:

$$n_{\text{надир}} = N(0,5 - \psi / \Theta) + 0,5 \text{ для МСУ-МП} \quad (9.1)$$

$$n_{\text{надир}} = N / 2 - ((\text{tg}\psi) \cdot f / b) \text{ для КМСС}, \quad (9.2)$$

где ψ – полный угол крена. При этом следует учитывать знаки углов β и ψ , которые, в частном случае, могут быть разными (соответствовать поворотам в разные стороны).

Тангажу соответствует поворот ОУ вокруг оси y на рис. 1. На рис. 2, б изображено влияние тангажа на геометрию съёмки. Видно, что в случае ненулевого угла тангажа α увеличивается расстояние H' от КА до подстилающей поверхности (точка A') и уменьшается радиус сечения шара плоскостью сканирования $R'=O'A'$. Легко найти:

$$R' = R \cos(\alpha + \phi'), \quad (10)$$

$$H' = H(\cos \alpha + \sqrt{2(R/H)^2(1 - \cos \phi') - \sin^2 \alpha}), \quad (11)$$

где ϕ' – геоцентрический угол, соответствующий α и вычисляемый аналогично (2):

$$\phi' = \arcsin[(R + H) \sin \alpha / R] - \alpha. \quad (12)$$

Таким образом, для получения прямой зависимости GSI^{nonep} , $GIFOV^{\text{nonep}}$ и GSI^{prod} от номера пикселя в строке, а также учёта влияния крена и тангажа на величину проекции пикселя достаточно подставить в формулы (1) – (4) угол θ_n , определяемый формулой (7) и H' , R' вместо H ; R . Для GSI^{prod} влияние крена и тангажа учитываются подстановкой в формулу (6) геоцентрического угла с внесёнными поправками.

Согласно эксплуатационной документации на камеры МСУ-100М ОУ КМСС-М (название ОУ КМСС, установленного на КА «Метеор-М» № 2), расстояние между центрами чувствительных эле-

ментов ЛПЗС разных спектральных каналов составляет $d = 15,24$ мм, причём «надирным» является спектральный канал с пропусканием $0,63 - 0,68$ мкм. Легко рассчитать, что для «ненадирных» каналов КМСС-М это будет соответствовать повороту в фокальной плоскости на угол $\gamma = 2 \arcsin \frac{d}{2f}$, что для фокусного расстояния

объектива камеры МСУ-100М ≈ 100 мм даёт величину $\gamma \approx 8, 74^\circ$. Таким образом, для этих каналов КМСС-М следует использовать значения H' и R' , вычисленные при подстановке угла γ в (10) – (12) вместо угла тангажа α . В случае присутствия дополнительного тангажа при расчётах используется сумма углов $(\alpha + \gamma)$.

Значения параметров f, w, Θ, v, N для МСУ-МР и параметров $b_{\text{ПВС}}, f, N$ для КМСС следует брать из эксплуатационной и аттестационной документации на приборы. Высота H рассчитывается для каждой строки изображения при помощи данных БСКВУ. Углы крена и тангажа также могут быть получены при помощи данных БСКВУ.

Экспериментальная методика

Расчётная методика позволяет быстро получать значения GSI и $GIFOV$ для всех углов сканирования, но существенно зависит от актуальных значений углов ориентации КА в пространстве и, соответственно, от данных, получаемых БСКВУ. Как отмечалось во Введении, эти данные могут быть недоступны. Экспериментальная методика определения величины проекции пикселя ОУ более трудоёмка, однако не имеет этих ограничений, поскольку использует конечный информационный продукт – изображение. Также она может служить для решения обратной задачи – оценки ориентации КА по экспериментальным значениям проекции пикселя, измеренным на разных расстояниях от надира.

Для определения экспериментальной величины проекции пикселя ОУ на местность W предлагается в ручном или автоматическом режиме определять на снимке размер сечения стабильных объектов с контрастными границами в пикселях и сопоставлять его с размером сечения в метрах, определяемым на основе точных векторных карт.

Алгоритм методики заключается в следующем. Вдоль прямой, пересекающей выбранный географический объект в направлении, параллельном или перпендикулярном трассе полёта, строится яркостный профиль $L(n)$. Далее проводится кусочно-

полиномиальная интерполяция профиля кубическим сплайном $L_{\text{umm}}(n)$ и строится модуль производной от неё $|L'_{\text{umm}}(n)|$. Максимумы этой зависимости, соответствующие положению границ объекта, представляют собой линии с формой, близкой к распределению Гаусса (работы [6] и [7]). При помощи измерения расстояния в пикселях между ними $\Delta n_{\text{пикс}}$ и определения размера объекта на местности в выбранном сечении $S_{\text{об}}$ (в метрах), вычисляется величина проекции пикселя на местность W по формуле: $W = S_{\text{об}} / \Delta n_{\text{пикс}}$. Величина $S_{\text{об}}$ определяется на основе баз геопространственных данных (например, из баз GSHHG [8], [9] или OpenStreetMapData [10]), которые следует выбирать с учётом ожидаемого пространственного разрешения ОУ.

Для повышения точности методики рекомендуется для каждого расстояния от надира посчитать W для нескольких объектов и взять среднее арифметическое от всех измерений.

В качестве объектов исследования предпочтительны острова, так как их береговая линия представляет собой непрерывную границу, нахождение которой сравнительно легко автоматизировать. Следует выбирать небольшие в поперечном сечении (4 – 7 пикселей на снимке) острова, чтобы снизить погрешность, связанную с усреднением по пикселям, лежащим на разных расстояниях от надира. Если выбор острова невозможен, рекомендуется использовать полуострова, узкие мысы, озера с устойчивой во времени береговой линией и другие объекты с контрастной границей «вода – суша».

Рассмотрим для примера особенности изобразительных свойств снимков в разных спектральных каналах МСУ-МР (рис. 3).

Изображение в третьем канале МСУ-МР (1,6 – 1,8 мкм) имеет максимальную контрастность, что связано с относительно высоким коэффициентом отражения объектов суши и низким коэффициентом отражения воды в данном спектральном диапазоне [11]. Несколько меньший уровень контраста наблюдается во втором канале МСУ-МР (0,7 – 1,1 мкм). Существенно менее контрастны изображения в первом (0,5 – 0,7 мкм) и в четвёртом канале (3,5 – 4,1 мкм), однако, как видно из рис. 3, границы острова ещё однозначно определяемы по профилю яркости.

Как видно из рис. 3, в каналах 5 и 6 определить границы выбранных островов предложенным методом нельзя.

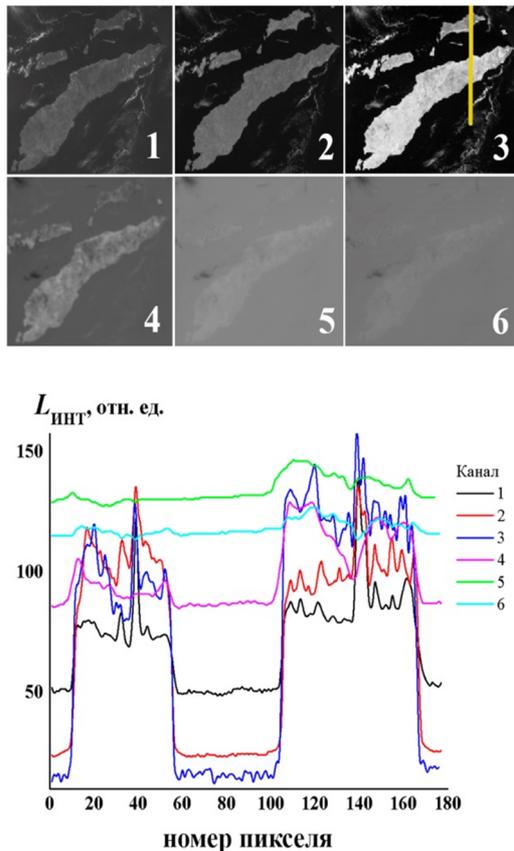


Рис. 3. Острова Ветар и Тимор (Индонезия) в шести спектральных каналах МСУ-МР 1 – 6 и профили яркости, соответствующие сечению, показанному на фрагменте снимка для третьего спектрального канала жёлтой линией. Снимок соответствует виткам 1749-1757 (КА «Метеор-М» №2)

Температуры суши и воды часто близки (особенно в экваториальных районах), что приводит к сложностям при определении границы «вода – суша». Несмотря на то, что выбор подходящих для реализации методики объектов в этих каналах существенно уже, чем в каналах 1 – 4, они могут быть найдены (рис. 4). Что касается КМСС, то диапазон спектральной чувствительности для всех трёх каналов этого ОУ находится в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра (0,535 – 0,900 мкм) и, соответственно, обеспечивает лёгкий выбор объектов в каждом канале. Это связано с тем, что в соответствующих спектральных диапазонах (10,5 – 11,5 мкм и 11,5 – 12,5 мкм) регистрируется собственное излучение объектов, зависящее от их температуры.

Стоит отметить, что если экспериментальная методика используется для контроля ориентации КА, необязательно проводить исследования для всех спектральных каналов.

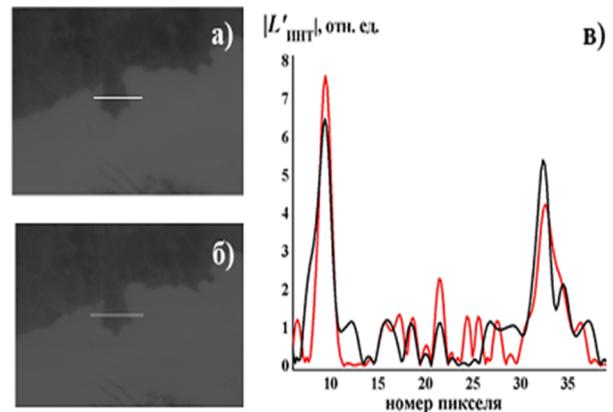


Рис. 4. Фрагмент снимка МСУ-МР – полуостров в Хабаровском крае в пятом (а) и шестом (б) спектральных каналах; (в) – модуль производной от интерполированного яркостного профиля, построенного вдоль прямой, обозначенной на (а) и (б). Чёрная линия – пятый канал, красная – шестой. Снимок соответствует виткам 1749-1757 (КА «Метеор-М» № 2)

В этом случае рекомендуется выбирать спектральный канал с пропусканием (1,6 – 1,8 мкм) для МСУ-МР и спектральный канал с пропусканием (0,7 – 0,9 мкм) для КМСС как обеспечивающие наилучшую контрастность для большинства объектов [11]. Среди требований к исследуемым фрагментам снимков стоит выделить отсутствие на них облаков и солнечных бликов.

Предложенные методики позволяют определить величину проекции пикселя на местность (W), однако не подходят для оценки пространственного разрешения (Δs), которое определяется наименьшим различимым на снимке объектом. Величина Δs всегда превышает W , что определяется различными процессами, в частности, их большое различие может объясняться выпадением криоосадков на оптических элементах ОУ. Для оценки пространственного разрешения можно воспользоваться известным способом [12], который заключается в измерении ширины на полувысоте ($FWHM$) функции рассеяния линии (ФРЛ), измеренной на контрастной границе. ФРЛ может быть найдена дифференцированием функции рассеяния границы ФРГ (яркостного профиля, пересекающего границу). Тогда пространственное разрешение рассчитывается по формуле $\Delta s = FWHM \cdot W$. Оба экспериментальных метода могут быть совмещены: например, расстояние между максимумами производной на рис. 4, в определит W , а их ширина на полувысоте – величину Δs .

Апробация методик

Для нахождения $W^{попер}$ и $W^{прод}$ были выбраны снимки, полученные МСУ-МР (КА «Метеор-М» №2) и камерой МСУ-100М-2 ОУ КМСС-М на разных витках полёта. Измерения проводились в спектральном канале с пропусканием 1,6 – 1,8 мкм в случае МСУ-МР и 0,76 – 0,90 мкм в случае КМСС-М.

Результаты определения проекции пикселя на местность в направлении, перпендикулярном полёту КА, по снимкам и основные параметры измерений

№ измерения	витка КА	Среднее расстояние от начала строки, пикселей	Размер в выбранном сечении, пикселей	Размер в выбранном сечении, км	$W^{попер}$, м
МСУ-МР					
1*	1777-1785	131	6,93	16,76	2418
2	1785-1791	326	22,56	31,92	1415
3	1771-1777	742	31,70		1007
4	1757-1763	1162	23,11		1381
5	1734-1742	1530,63	6,44		4957
6	2373-2374	1559,675	4,45		7173
КМСС					
1*	564	1006	85,5	4,74	55
2*		3171	41,4	2,49	60
3*		4994	155,99	10,33	66
4*		7832	32,4	2,46	76

* Измерение №1 МСУ-МР проводилось по острову Масира (20°28'16" с. ш. 58°48'55" в. д.); измерение №1 КМСС-М проводилось по острову Каламос (38°37' с. ш. 20°55' в. д.); измерение № 2 КМСС-М проводилось по острову Схиза (36°43' с. ш. 21°46' в. д.); измерение №3 КМСС-М проводилось по острову Эгина (37°45' с. ш. 23°26' в. д.); измерение № 4 КМСС-М проводилось по острову Тирасия (36°26' с. ш. 25°20' в. д.).

На рис. 5 и в таблице приводятся основные этапы определения $W^{попер}$ по снимкам и результаты измерений (на рисунке в качестве примера приведены измерения для МСУ-МР). Размер в выбранном сечении (в метрах) определялся при помощи

данных базы GSHHG в случае МСУ-МР и базы OpenStreetMapData в случае КМСС-М.

Измерения 2 – 6 МСУ-МР проводились по острову Анхель-де-ла-Гуарда (29°15'36" с. ш. 113°22'13" з. д.), находившемся на различных витках в разном положении относительно надира. Визуально хорошо заметно «сжатие» острова (увеличение $GSI^{попер}$ и $GIFOV^{попер}$) при приближении его изображения к краям кадра (рис. 5, а).

Расчётные $GSI^{попер}$ и $GIFOV^{попер}$ были получены с использованием следующих известных параметров для МСУ-МР: $f = 150$ мм, $w = 0,2$ мм для каналов 1, 2; $f = 150$ мм, $w = 0,18$ мм для канала 3; $f = 40$ мм, $w_{попереч} = 0,05$ мм для каналов 4, 6; $N = 1572$, $\Theta = 110,5^\circ$, $H = 832$ км. Угол крена $\psi \approx 2,26^\circ$ был определён при помощи сопоставления характерных точек снимка МСУ-МР с опорными картографическими данными (векторная карта береговых линий). Аналогично было установлено, что наличием тангажа для указанных снимков можно пренебречь. Для КМСС-М были использованы следующие известные параметры: $b_{ПЗС} = 7$ мкм, $f = 101,314$ мм (канал с пропусканием 0,76 – 0,90 мкм), $f = 100,180$ мм (канал с пропусканием 0,63 – 0,68 мкм), $f = 101,307$ мм (канал с пропусканием 0,535 – 0,575 мкм), $N = 7926$ пикселей и сделан вывод, что углами крена и тангажа (исключая угол γ из раздела «Расчётная методика») можно пренебречь.

Различие расчётных значений $GSI^{попер}$ и $GIFOV^{попер}$ в третьем спектральном канале МСУ-МР не превышает 2,5%, при этом $GSI^{попер} > GIFOV^{попер}$. В других спектральных каналах МСУ-МР, наоборот, $GIFOV^{попер}$ превышает $GSI^{попер}$ приблизительно на 9% и 2% соответственно, что связано с различными f и w для этих каналов. Сравнение расчётных $GSI^{попер}$ и экспериментальных $W^{попер}$ результатов определения проекции пикселя на местность показывает их очень хорошее согласие как для МСУ-МР так и для КМСС-М (рис. 6, а и 7, а). При измерениях в направлении, поперечном трассе полёта КА для МСУ-МР $GSI^{попер}_{надир} = 1,021$ км; экспериментальная величина отличается от расчётной менее чем на 1%. Для КМСС-М отличие $GSI^{попер}$ от $W^{попер}$ не превышает 1,1% для всех изменений.

Положение надира рассчитывалось по формулам (9.1) и (9.2) и составило для МСУ-МР 754 пикселя от начала строки, что приблизительно соответствует измерению №3 в таблице. Для камеры МСУ-100М-2 КМСС-М надиры располагались между $n = 354$ и $n = 355$.

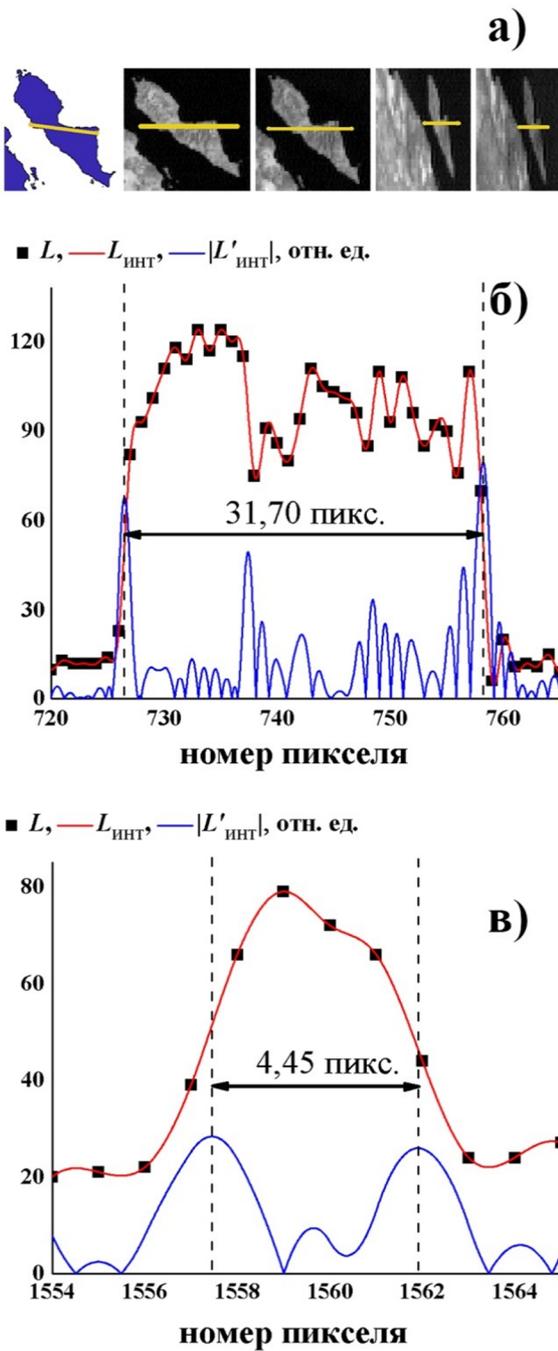


Рис. 5. Экспериментальное определение проекции пикселя МСУ-МР на местность в направлении, перпендикулярном полёту КА (остров Анхель-де-ла-Гуарда): *а* – слева направо: векторные данные GSHHG, фрагменты снимков МСУ-МР для измерений № 3 – 6 (см. таблицу), где жёлтая линия – выбранное сечение; *б* и *в* – профили яркости (чёрные точки), интерполированные профили (красные линии), модули производной от интерполированных профилей (синие линии) для измерений № 3 и № 6 соответственно

Также были проведены расчёты величины GSI^{prod} в зависимости от номера пикселя строки (рис. 6, *б* и 7, *б*). В расчётах использовались $T = 101,41$ мин и частоты $\nu = 6,5$ Гц для МСУ-МР; $\nu = 156,25$ Гц для КМСС-М.

Результаты расчётов наглядно демонстрируют, что величина GSI^{nonper} по мере удаления пикселя от надира гораздо более существенно изменяется по сравнению с её значением в надире, чем величина GSI^{prod} . Экспериментальные значения величины проекции пикселя МСУ-МР в надире $W_{надир}^{prod}$ были определены при помощи островов Ветар и Тимор по снимку, соответствующему 1749 – 1757 виткам КА (см. рис. 3). Среднее арифметическое от двух экспериментальных значений $W_{надир}^{prod}$ составило величину 1,011 км; соответствующая расчётная величина $GSI_{надир}^{prod}$ составила 1,012 км.

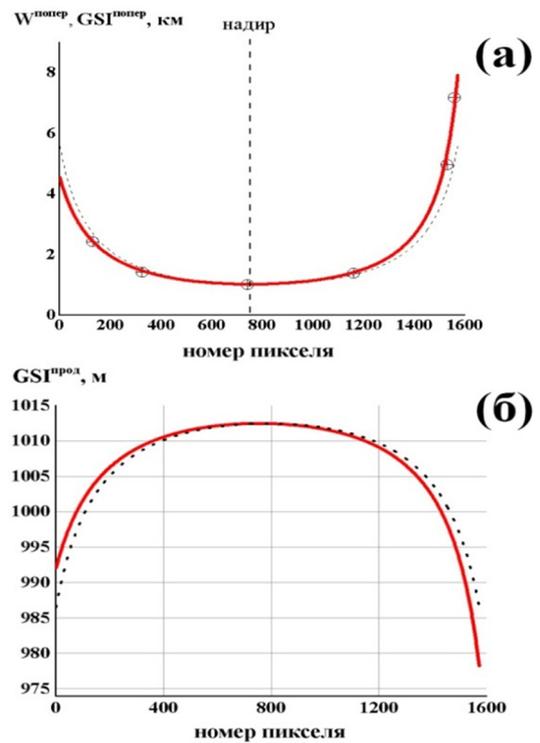


Рис. 6. Зависимость величины проекции пикселя на местность от номера пикселя строки в третьем спектральном канале МСУ-МР: *а* – поперёк полёта КА, *б* – вдоль полёта КА. Точки – экспериментальные значения, сплошные линии – расчётные зависимости с учётом крена, штриховые линии – расчётные зависимости при нулевом угле крена

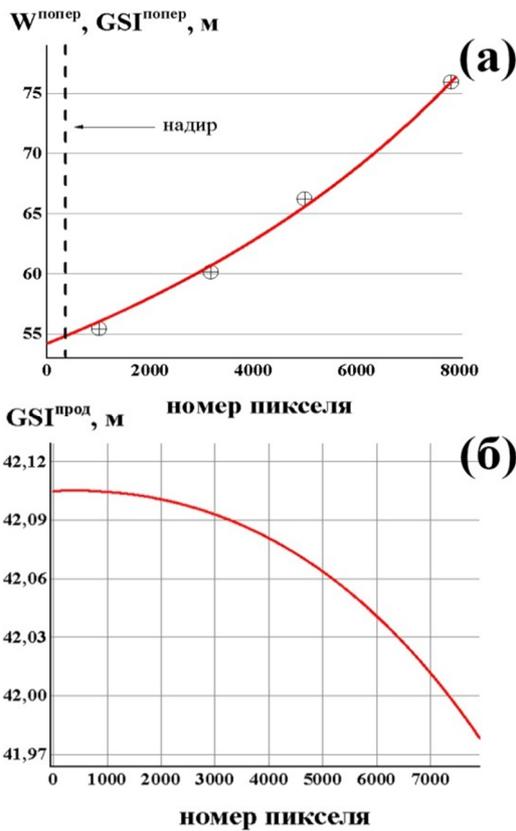


Рис. 7. Зависимость величины проекции пикселя на местность от номера пикселя строки в спектральном канале с пропусканием 0,76 – 0,90 мкм камеры МСУ-100М-2 КМСС-М: *a* – поперёк полёта КА, *б* – вдоль полёта КА. Точки – экспериментальные значения, сплошные линии – расчётные зависимости

Таким образом, разница между расчётным и экспериментальным результатами составила 0,1 %. Экспериментальные данные $W_{\text{прод}}$ для КМСС-М были получены для шести объектов со снимка, соответствующего витку 569 КА (озеро Ледяное, озеро Тытыль, озеро Эльгыгытгын и др.). Наибольшее отклонение $W_{\text{прод}}$ от расчётного результата ($GSI_{\text{надир}}^{\text{прод}} = 42,1 \text{ м}$) не превысило величину 1,9 %.

Также были проведены оценки пространственного разрешения Δs при помощи измерений $FWHM$ на контрастной границе. Основные этапы расчётов проиллюстрированы на рис. 8. Измерения проводились для витка 564 КА «Метеор-М» № 2 ОУ КМСС-М в канале с пропусканием 0,76 – 0,90 мкм.

В качестве тестового объекта, иллюстрирующего реализацию описанного алгоритма для КМСС, была выбрана береговая линия острова Лefкада (Греция), почти идеально перпендикулярная к направлению полёта КА и находящаяся близко к линии надира.

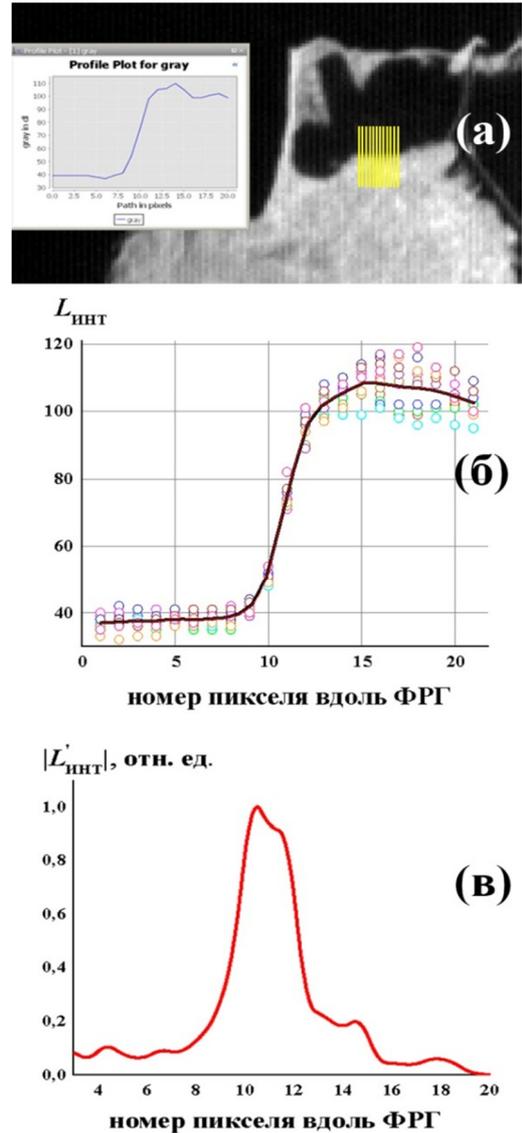


Рис. 8. Основные этапы вычисления FWHM. Нахождение яркостных профилей на снимке КМСС-М (*a*), построение усреднённого профиля (*б*), построение нормализованной производной от интерполированного профиля (*в*)

На рис. 8, *a* вертикальными линиями показаны положения рассчитываемых яркостных профилей на снимке, на рис. 8, *б* разноцветными точками показаны ФРГ для разных линий, а сплошной линией – среднее значение по двенадцати измерениям. Далее по интерполированному профилю усреднённой ФРГ была получена ФРЛ (рис. 8, *в*), по которой была определена величина FWHM, составившая 2,66 пикселя.

При помощи определённой ранее величины проекции пикселя на местность была вычислена величина пространственного разрешения, измеренного вдоль трассы КА, которая составила 114,85 м. Анало-

гичные измерения для МСУ-МР показали, что пространственное разрешение в надире, измеренное в третьем спектральном канале, по абсолютной величине не превышает 1,4 км.

Заключение

Проведённая апробация предлагаемых в работе расчётной и экспериментальной методик определения проекции пикселя на местность демонстрирует их хорошее согласие как для аппаратуры КМСС, так и для аппаратуры МСУ-МР. Обе методики рекомендуется использовать в комплексе, при этом возможна их полная автоматизация.

Также предлагается метод оценки величины пространственного разрешения по снимкам.

Апробация проводилась по снимкам, полученным с КА «Метеор-М» № 2, но может быть использована и для оценки изображений МСУ-МР и КМСС, которые будут установлены на планируемых в ближайшие годы к запуску КА «Метеор-М» № 2-1 и «Метеор-М» № 2-2, что обуславливает актуальность методик.

Литература

1. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М., Косцов В. С. Спутниковое температурное зондирование атмосферы в облачных условиях // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 5. – С. 37 – 42.
2. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Боярчук К. А., Тертышников А. В., Юдин И. А. Единая концепция обнаружения признаков подготовки сильного землетрясения в комплексной системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 6. – С. 81 – 90.
3. Кузнецов А. Е., Пошехонов В. И. Оценка высоты облачности по данным комплекса многозональной сканерной съёмки космического аппарата «Метеор-М» // Цифровая Обработка Сигналов. – 2009. – № 3. – С. 41 – 46.
4. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. – Third Edition / R. A. Schowengerdt. – Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press, 2007. – 515 p.
5. Brush R. J. H. The navigation of AVHRR imagery // International Journal of Remote Sensing. – 1988. – 9 (9). – P. 1491 – 1502.
6. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. 8. – № 6. – P. 679 – 698.
7. Korn A. F. Toward a symbolic representation of intensity changes in images // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1988. – V. 10. – № 5. – P. 610 – 625.
8. Wessel P. and Smith W. H. F. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database // Journal of Geophysical Research. – 1996. – V. 101. – № B4. – P. 8741 – 8743.
9. GSHHG – A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database [Электронный ресурс] – URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>. – (Дата обращения: 22.06.2016).
10. OpenStreetMapData [Электронный ресурс]. – URL: <http://openstreetmapdata.com>. – (Дата обращения: 22.06.2016).
11. Дейвис Ш. М., Ландгребе Д. А., Филлипс Т. Л. и др. Дистанционное зондирование: количественный подход: пер. с англ. / Ш. М. Дейвис и др. – М.: Недра, 1983. – 415 с.
12. Kasal B., Sharp P. F. Gamma camera spatial resolution as measured by the bar phantom // Physics in Medicine and Biology. – 1985. – V. 30. – № 3. – P. 263 – 266.

Поступила в редакцию 09.12.2016

Илья Григорьевич Симановский, канд. физ.-мат. наук, доцент,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
ведущий научн. сотрудник АО «СТТ групп»,
т. (919) 760-28-29, e-mail: ilya_simanovsky@mail.ru.

Егор Александрович Зеленин,
младший научн. сотрудник, Геологический институт РАН,
науч. сотрудник, АО «СТТ групп»,
т. (916) 908-16-85, e-mail: e.zelenin@cttgroup.ru.

Лада Евгеньевна Черненко,
научный сотрудник, АО «СТТ групп»,
т. (910) 445-21-77, e-mail: chernenko@cttgroup.ru.

Полина Геннадьевна Михайлюкова,
ведущий инженер, МГУ им. М.В. Ломоносова,
главный специалист, АО «СТТ групп»,
т. (909) 635-09-90, e-mail: p.mikhailukova@cttgroup.ru.
Борис Валерьевич Райченко,
начальник управления, АО «СТТ групп»,
т. (916) 793-05-13, e-mail: b.raychenko@cttgroup.ru.

METHODOLOGIES OF EVALUATING THE MSU-MR AND MULTISPECTRAL IMAGING SYSTEM PIXEL PROJECTION ON THE DESIGNATED AREA

I.G. Simanovskii, E.A. Zelenin, L.E. Chernenko
P.G. Mikhailiukova, B.V. Raichenko

The current article is dedicated to the computation and experimental (based on images) methodology of evaluating the MSU-MR and Multispectral Imaging System pixel projection on the designated area in the direction matching the direction of spacecraft motion and perpendicular to it. It is assumed that the GSI discretisation ground interval values as well as the GIFOV instantaneous-field-of-view values will be calculated using the known geometrical parameters of the imaging system and data from the on-board synchronizing coordination and navigation device, while all the experimental results are to be calculated using the brightness profiles crossing stable objects with contrast borders on the image (e.g. islands) with further mathematical processing and comparison of those profiles with actual sizes of those objects, determined by the geospatial data bases. Primary formulas and algorithms are provided for both methodologies. Correlation has been analyzed between the pixel projection and the scanning angle or the number of pixel in the line. Roll and yaw impact on the pixel projection scale has been taken into account. The described methodologies have been evaluated based on the Multispectral Imaging System and MSU-MR images received from METEOR-M # 2 SC. The comparison of estimated and experimental results of calculated value of pixel projection on the designated area has been performed, their conformity has been noted.

Key words: METEOR-M, Remote Earth Sensing, MSU-MR, Multispectral Imaging System, pixel projection, spatial resolution, discretization interval, field of view, roll, line scanner, longitudinal CCD-scanner, satellite images.

References

1. Poliakov A. V., Timofeev Iu. M., Kostsov V. S. Satellite thermal probing of atmosphere under the cloud cover // Earth and space exploration. – 2012. – No. 5. – P. 37 – 42.
2. Pulinets S. A., Uzunov D. P., Karelin A. V., Boiarchuk K. A., Tertyshnikov A. V., Iudin I. A. Unified concept of detecting the signs of impending strong earthquake in a complex system lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere // Heliophysical research. – 2013. – Publication 6. – P. 81 – 90.
3. Kuznetsov A. E., Poshekhonov V. I. Evaluation of cloud height using the data of the multispectral scanner installed on the METEOR-M spacecraft // Digital signal processing. – 2009. – No. 3. – P. 41 – 46.
4. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. – Third Edition / Schowengerdt R. A. – Amsterdam : Elsevier; Burlington : Academic Press, 2007. – 515 p.
5. Brush R. J. H. The navigation of AVHRR imagery // International Journal of Remote Sensing. – 1988. – 9 (9). – P. 1491 – 1502.
6. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. 8. – № 6. – P. 679 – 698.
7. Korn A. F. Toward a symbolic representation of intensity changes in images // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1988. – V. 10. – № 5. – P. 610 – 625.
8. Wessel P. and Smith W. H. F. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database // Journal of Geophysical Research. – 1996. – V. 101. – № B4. – P. 8741 – 8743.
9. GSHHG – A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database [Digital resource]. – URL : <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>. – (Application date : 22.06.2016).
10. OpenStreetMapData [Digital resource]. – URL : <http://openstreetmapdata.com>. – (Application date : 22.06.2016).
11. Davis Sh. M., Landgrebe D. A., Phillips T. L. and others. Remote sensing: quantitative approach: translated from English / Davis Sh. M. and others. – M. : Nedra, 1983. – 415 p.
12. Kasal B., Sharp P. F. Gamma camera spatial resolution as measured by the bar phantom // Physics in Medicine and Biology. – 1985. – V. 30. – № 3. – P. 263 – 266.

Илья Григорьевич Симаковский,
Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Associate Professor
MEPhI National Research Nuclear University,
Leading Researcher of 'CTT group' JC,
tel. (919) 760-28-29, e-mail: ilya_simanovsky@mail.ru.

Egor Aleksandrovich Zelenin,
Junior Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences,
Researcher of 'CTT group' JC,
tel. (916) 908-16-85, e-mail: e.zelenin@cttgroup.ru.

Lada Evgenevna Chernenko,
Researcher of 'CTT group' JC,
tel. (910) 445-21-77, e-mail: chernenko@cttgroup.ru.

Polina Gennadevna Mikhailukova,
Leading Engineer, Lomonosov Moscow State University,
Chief Specialist, 'CTT group' JC,
tel. (909) 635-09-90, e-mail: p.mikhailukova@cttgroup.ru.

Boris Valerevich Raichenko,
Head of Department, 'CTT group' JC,
tel. (916) 793-05-13, e-mail: b.raichenko@cttgroup.ru.