

Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М»

Б.С. Жуков¹, А.С. Василейский², С.Б. Жуков², Я.Л. Зиман¹, И.В. Полянский¹,
О.В. Бекренев³, Л.И. Пермитина³

¹Институт космических исследований РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru

²Автономная некоммерческая организация «Космос-НТ»

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: ano_cnt@ofo.iki.rssi.ru

³ Научный центр оперативного мониторинга Земли ФГУП «РНИИ КП»

127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, строение 25

E-mail: permitina@ntsomz.ru

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М» №1 позволит получать видеоданные в полосе захвата шириной более 900 км с разрешением 60 м в трех спектральных зонах, оптимизированных для исследований суши, и с разрешением 120 м в трех зонах, оптимизированных для исследований акваторий. На этапе летно-конструкторских испытаний КА предварительная обработка видеоданных КМСС до уровня L1B будет проводиться в НЦ ОМЗ по разработанным в ИКИ РАН, АНО «Космос-НТ» и НЦ ОМЗ программам. После выделения видеоданных КМСС, служебной и навигационной информации из информационного потока КА проводятся: радиометрическая коррекция видеоданных и формирование зональных изображений, их временная и географическая привязка и геометрическое совмещение. Результаты предварительной обработки видеоданных КМСС архивируются.

Введение

На борту космического аппарата «Метеор-М» №1 будет установлен Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), который позволит выполнять обзорные съемки земной поверхности со средним пространственным разрешением в видимом и ближнем ИК диапазонах для экоприродного мониторинга в научных, природоохранных и хозяйственных целях [1, 2]. В данной работе описывается разработанное в ИКИ РАН, АНО «Космос-НТ» и НЦ ОМЗ программно-алгоритмическое обеспечение предварительной обработки данных КМСС до уровня L1B, которое на этапе летно-конструкторских испытаний КА будет использоваться в потоковом режиме при обработке видеоданных КМСС в НЦ ОМЗ.

Основные характеристики КМСС

В состав КМСС входят три многозональных съемочных устройства (МСУ), выполненные в виде отдельных конструктивных блоков:

- два МСУ-100, предназначенные для съемки поверхности суши,
- одно МСУ-50, предназначенное для съемки акваторий.

Основные характеристики камер КМСС приведены в Табл. 1.

На рис. 1 приведена геометрическая схема съемки КМСС. Два прибора МСУ-100 устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 14^\circ$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. В результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора МСУ-100, примерно равной полосе обзора МСУ-50 (960 и 940 км соответственно). С другой стороны, поскольку расстояние между центрами чувствительных элементов линейных ПЗС разных спектральных каналов в фокальной плоскости МСУ-50 и МСУ-100 составляет 15,24 мм, одни и те же объекты на земной поверхности

наблюдаются в разных спектральных каналах с временной задержкой 18,6 сек и под разными углами в орбитальной плоскости: -16,95, 0 и +16,95° для МСУ-50 и -8,67, 0 и +8,67° для МСУ-100.

Таблица 1. Основные характеристики камер КМСС

Параметры	Камера	
	МСУ-100	МСУ-50
Фотоприемники	3 линейных ПЗС	
Число элементов в строке	3 × 7926	
Захват, км (H = 830 км)	960 (двумя камерами)	940
Проекция элемента на поверхность, м (H = 830 км)	60	120
Спектральные зоны, нм	535-575 630-680 700-900	370-450 450-510 580-690
Частота строк, Гц	156,25	
Информационный поток одной камеры, Мбит/сек	~30	
Разрядность АЦП / изображения, бит	16 / 8	
Динамический диапазон ПЗС	5000	
Масса, кг	2,9	2,3
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8
Число камер	2	1

Для географической привязки видеоданных КМСС будут использоваться навигационные измерения, которые будут осуществляться штатными системами измерения положения и ориентации КА, а также в экспериментальном режиме – Комплексом координатно-временного обеспечения (ККВО) [3].

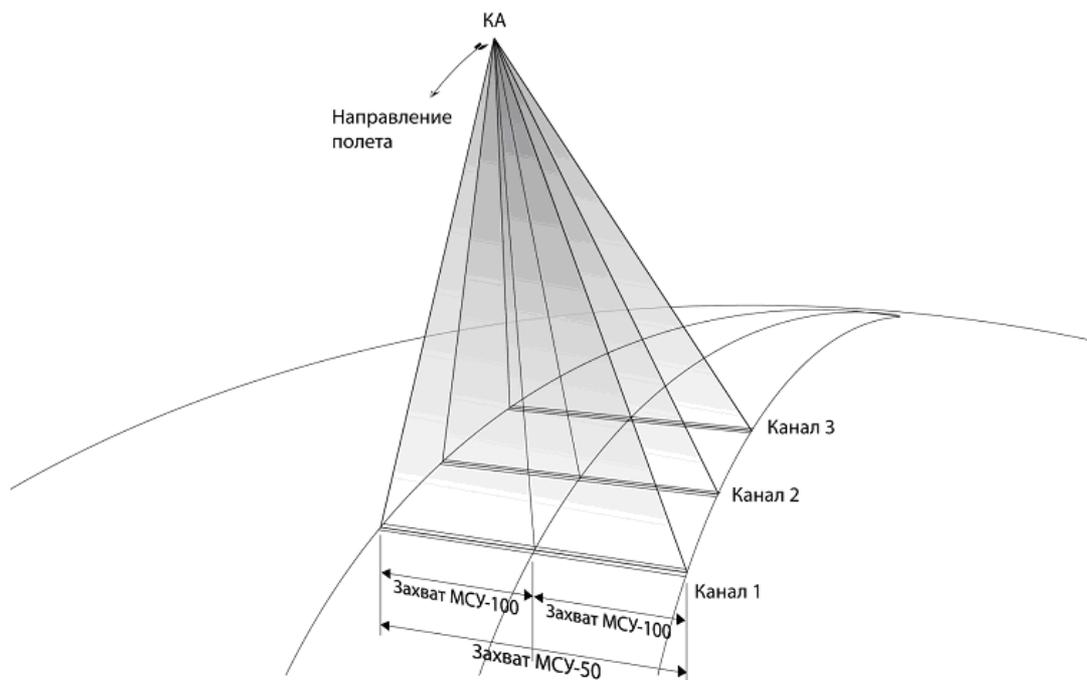


Рис. 1. Геометрия съемки КМСС

Структура программно-алгоритмического обеспечения предварительной обработки видеоданных КМСС

Принятая информация с КА «Метеор-М» №1 поступает с антенны НЦ ОМЗ на станцию приема и затем НЦ ОМЗ на сервер предварительной обработки, где осуществляется выделение данных КМСС из общего потока и разбиение на эпизоды. Под эпизодом понимается фрагмент маршрута, в течение которого соблюдается последовательность порядковых номеров строк видеоданных (штатно одному маршруту будет соответствовать только один эпизод, появление нескольких эпизодов возможно только при нештатной работе бортовых систем или приёмного комплекса). Для каждого эпизода формируются следующие файлы:

- приборный файл, содержащий строки упакованных данных КМСС,
- навигационный файл, содержащий информацию о времени, положении, скорости и ориентации КА на момент получения каждой строки по данным служебных систем КА «Метеор-М №1,
- файл данных ККВО,
- файл заголовка (метаданные), содержащий в себе всю информацию о сеансе измерений.

Предварительная обработка видеоданных КМСС проводится по эпизодам и включает следующие этапы (рис. 2):

- (1) разбиение эпизода на кадры, радиометрическая коррекция и создание зональных изображений,
- (2) временная и географическая привязка изображений с использованием информации о положении и ориентации КА,
- (3) геометрическое совмещение зональных изображений на заданной географической сетке.

Обработка видеоданных КМСС проводится с помощью консольных приложений *KMSS_RadGeo*, реализующего первые два этапа обработки, и *KMSS_Coreg*, реализующего третий этап.

Входной информацией для программы *KMSS_RadGeo* являются приборный и навигационный файлы и файл заголовка, а выходной информацией - радиометрически скорректированные зональные изображения («файл-матрицы») с разбивкой по кадрам и соответствующие им файло-сетки географической привязки. Эта информация является входной для приложения *KMSS_Coreg*, которое формирует совмещенное изображение и «Квиклук». Информация обо всех этапах обработки добавляется в файл заголовка.

Выходные файлы, соответствующие каждому кадру, архивируются.

В следующих разделах рассматриваются алгоритмы радиометрической коррекции, географической привязки и геометрического совмещения изображений. Вопросы функционирования технологической цепочки потоковой обработки данных КМСС в НЦ ОМЗ обсуждаются в работе [5]. Тематическое использование данных КМСС, прошедших предварительную обработку, обсуждается в работах [6, 7].

Радиометрическая коррекция видеоданных КМСС

Входной информацией для процедуры радиометрической коррекции является

- приборный файл камеры МСУ50/100,
- калибровочные файлы.

Из приборного файла МСУ выделяются:

- строки трех зональных изображений $DN(x, y, ch)$, т.е. цифровые значения пикселей x для строки y в канале ch ,
- время экспонирования τ ,
- коэффициенты усиления для каждого канала $k(ch)$.

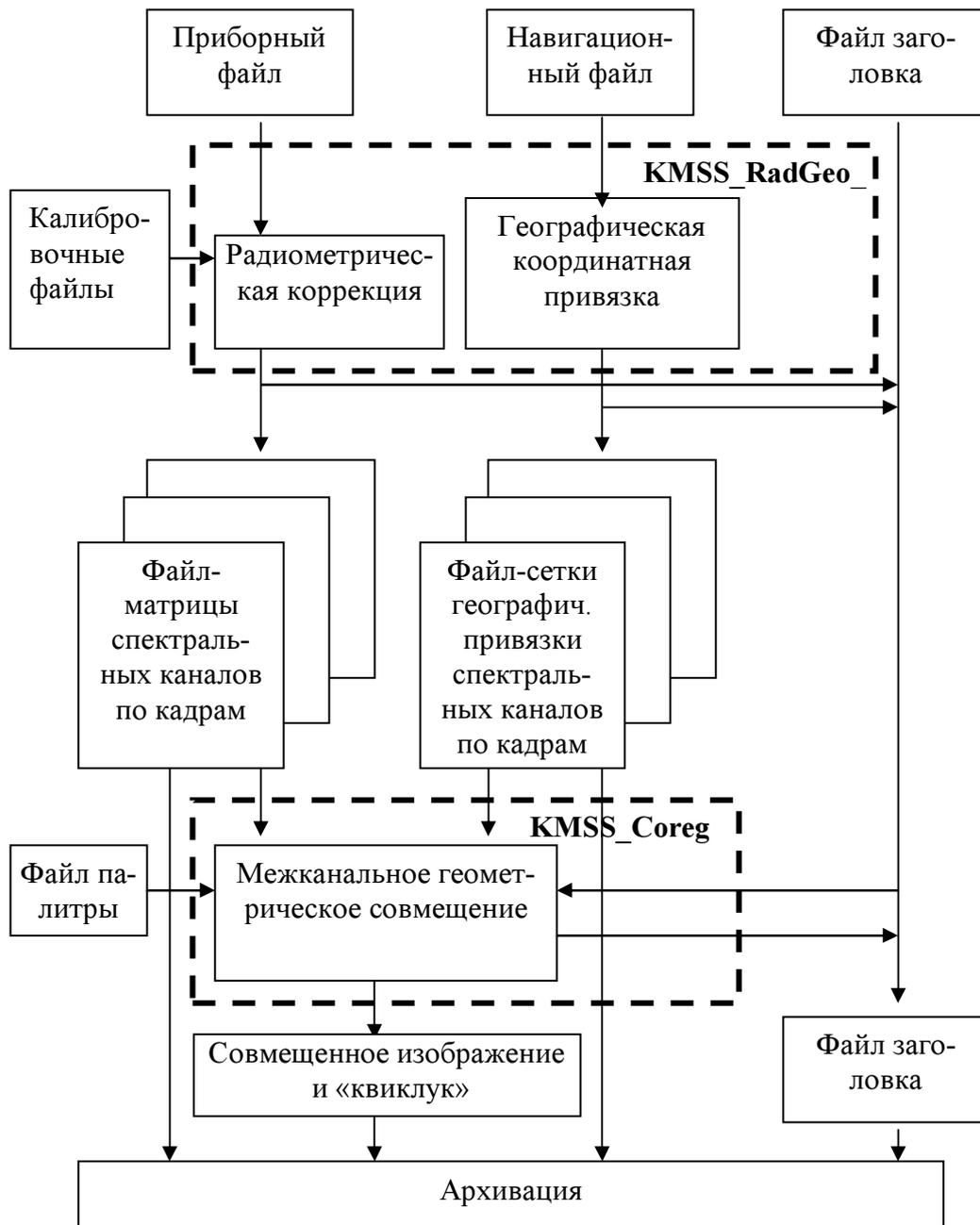


Рис. 2. Схема предварительной обработки данных КМСС

Параметры τ и $k(ch)$ постоянны в пределах маршрута.

Преобразование цифрового сигнала пикселей изображения в абсолютную яркость проводится по соотношению:

$$B(x, y, ch) = \frac{DN(x, y, ch) - DC(x, y, ch)}{c(x, ch)},$$

где $B(x, y, ch)$ - абсолютная яркость [в Вт/(м²·мкм·ср)] пиксела, $c(x, ch)$ - актуальные коэффициенты чувствительности элементов детектора, $DC(x, y, ch)$ - актуальный темновой сигнал элементов детектора.

Актуальный коэффициент чувствительности равен:

$$c(x, ch) = c_0(x, ch) \cdot \frac{\tau}{\tau_0(ch)} \cdot \frac{k(ch)}{k_0(ch)},$$

где $c_0(x, ch)$ - калиброванный коэффициент чувствительности для элементов x канала ch камеры,

$\tau_0(ch)$ и $k_0(ch)$ - время экспонирования и коэффициенты усиления, использовавшиеся при наземной калибровке каналов камеры.

Актуальный темновой сигнал определяется как:

$$DC(x, y, ch) = DC_0(x, ch) + \Delta DC(m(x), y, ch),$$

где $DC_0(x, ch)$ - калиброванный темновой сигнал для элементов x линейки ch камеры, $\Delta DC(m(x), y, ch)$ - определяемая в полете поправка к темновому сигналу для строки y в канале ch , зависящая от четности m элемента x ($m = 0$ или 1 соответственно для четных и нечетных элементов). Коррекция темнового сигнала в полете позволяет как адаптироваться к его вариациям, например, вследствие изменения температуры, так и учесть эффект различия напряжения сдвига при калибровке и при реальной съемке.

$\Delta DC(m, y, ch)$ определяется по сигналу темновых элементов линейки следующим образом:

$$\Delta DC(m, y, ch) = \frac{1}{N_d(m)} \sum_{\substack{0 \leq v < 79 \\ \text{mod}(v, 2) = m}} [DN(v, y) - DC_0(v, ch)],$$

где $\text{mod}(u, 2)$ - остаток от деления номера темнового элемента v по модулю 2, $N_d(m)$ число темновых элементов четности m . Таким образом учитывается, что используемые в камерах КМСС линейный ПЗС-детекторы имеют два несколько отличающиеся по своим характеристикам выходных регистра с чередованием считывания накопленных элементарными детекторами сигналов.

Массивы $c(x, ch)$ и $DC_0(x, ch)$ для каждой камеры (вместе с соответствующими значениями τ_0 и $k_0(ch)$) входят в состав калибровочных файлов. Они определяются по результатам наземной калибровки, проверяются и при необходимости уточняются в полете.

Для сокращения объема данных зональные изображения, калиброванные в абсолютных яркостях, преобразуются в 16-битные файл-матрицы по соотношению:

$$I(x, y, ch) = INT \left[\frac{B(x, y, ch)}{B1(ch)} + 0.5 \right]$$

где $B1(ch) = 0.1$, функция INT возвращает целую часть аргумента.

Калиброванные зональные изображения разбиваются на кадры с учетом номинального сдвига каналов так, что кадры имеют примерно равный линейный размер в метрах вдоль и поперёк направления полёта.

Временная и географическая привязка зональных изображений

Временная и географическая привязка каждого зонального изображения в кадре осуществляется на сетке с шагом 100 пикселей, обеспечивающей при билинейной интерполяции точность аппроксимации геометрической привязки не хуже 7 м (по сравнению с прямым расчетом географических координат каждого пикселя). Для каждого узла сетки географической привязки определяются:

- время съемки,
- географические координаты узла в градусах,
- вектор направления из узла на КА и
- вектор направления из узла на Солнце.

Все координаты и компоненты векторов определяются в геоцентрической вращающейся (географической) системе координат WGS84.

Входными параметрами для вычисления указанных характеристик узла являются приведенные в навигационном файле для соответствующей строки:

- время T , отчитываемое в сутках, прошедших с полуночи 12/30/1899,
- радиус вектор положения КА в географической системе координат r_o ,

– $A_{ГСК \leftarrow КА}$ – матрица преобразования из системы координат КА в географическую систему координат.

Географические координаты узла рассчитываются с использованием заданных в географической системе координат вектора положения КА r_0 и единичного вектора в направлении наблюдения:

$$e(x, y, ch) = A_{ГСК \leftarrow КА}(y) \cdot A_{КА \leftarrow ПСК} \cdot e_{ПСК}(x, ch),$$

где $A_{ГСК \leftarrow КА}(y)$ – матрица преобразования из системы координат КА в географическую систему координат для строки y (содержится в навигационном файле)

$A_{КА \leftarrow ПСК}$ – матрица преобразования из приборной системы координат заданной камеры в систему координат КА (содержится в калибровочных файлах),

$e_{ПСК}(x, ch)$ – вектор направления наблюдения для элемента x линейки ch в приборной системе координат камеры, компоненты которого содержится в калибровочных файлах.

Географические координаты узла находятся как широта и долгота узла (φ, λ) точки пересечения направления наблюдения с эллипсоидом WGS84.

Для расчета вектора направления на Солнце в географической системе координат на моменты съемки узлов используется алгоритм [4], обеспечивающий точность в пределах 0.01° на интервале времени от 1900 до 2100 гг.

Геометрическое совмещение зональных изображений

Геометрическое совмещение зональных изображений и формирование “Квиклук” осуществляется программой KMSS_Coreg. Совмещение проводится на сетке эллипсоида WGS-84 с заданным шагом по широте и долготе.

Входными параметрами для программы KMSS_Coreg являются:

- имя кадра,
- разрешение совмещенного изображения,
- имя файла палитры и показатель качества для формирования «квиклук».

Дополнительно в качестве входных параметров программы KMSS_Coreg могут задаваться наименьшие и наибольшие значения широты и долготы формируемого совмещенного изображения и «квиклук». В случае, если эти параметры не заданы, вместо них автоматически используются наименьшие и наибольшие значения широты и долготы узлов соответствующих файлов сетки зональных изображений кадра.

Имя кадра используется для определения имен файлов-матриц и файлов-сеток географической привязки зональных изображений, а также файла заголовка, соответствующих заданному кадру.

Файл палитры содержит информацию, используемую при преобразовании получаемых значений зональной яркости совмещенного изображения в цветовое пространство RGB цветосинтезированного изображения “Квиклук”. Файл палитры определяет, в какую компоненту цветового пространства RGB (красная, зеленая или синяя) будет преобразовано каждое из исходных зональных изображений и каковы значения яркости зональных изображений, соответствующие максимальным значениям цветовых компонент. Задаваемый в качестве входного параметра показатель качества определяет уровень потерь при финальном сжатии изображения “Квиклук” в соответствии со стандартом JPEG.

Принцип работы программы KMSS_Coreg состоит в трансформировании каждого из зональных изображений на сетку, определяемую заданными наименьшими и наибольшими значениями широты и долготы формируемого совмещенного изображения и заданным разрешением. Шаги

сетки совмещенного изображения по широте и долготе выбираются так, чтобы обеспечить заданное разрешение в центре кадра.

Для формирования трансформированного зонального изображения осуществляется:

(1) расчет координат центров пикселей трансформированного изображения в системе координат исходного изображения путем линейной интерполяции по сетке географической привязки;

(2) расчет сигнала пикселей трансформированного изображения усреднением по исходному изображению в пределах прямоугольника с центром в расчетном центре пикселя и размерами, определяемыми разрешением трансформированного изображения.

После формирования совмещенных зональных изображений осуществляется их преобразование в изображения – компоненты цветового пространства RGB с использованием файла палитры. Полученные компоненты формируют цветосинтезированное изображение “Квиклук”. Финальное сжатие цветосинтезированного изображения “Квиклук” осуществляется в соответствии со стандартом JPEG с заданным показателем качества.

Литература

1. *Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Куделин М.И. и др.* Комплекс многозональной съемочной аппаратуры, разрабатываемый для КА "Метеор-М" // Третья всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г. Сборник тезисов конференции. С.72.

2. *Жуков Б.С., Василейский А.С., Железнов М.М., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И.* Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: «ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. 1. С.222-228.

3. *Василейский А.С., Горбунов А.В., Фори А.А. и др.* Комплекс координатно-временного обеспечения системы управления полетом КА серии "Метеор-М" // 5-ая международная конференция «Авиация и космонавтика-2006», Москва, 23-26 октября 2006 г. Тезисы докладов. С.268-269.

4. *Меес Ж.* Астрономические формулы для калькуляторов. М.: Мир, 1988.

5. *Пахомов Л.А., Бекренев О.В., Пермитина Л.И., Аквилонова А.Б., Жуков Б.С., Василейский А.С.* Развитие информационной системы НЦ ОМЗ для обработки данных перспективного российского КА «Метеор-М» // Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". М., ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г. Сборник тезисов конференции.

6. *Новикова Н.Н., Пахомов Л.А., Пермитина Л.И. и др.* Материалы космического мониторинга окружающей среды как источник пространственных данных для регионов России // Пятый международный аэрокосмический конгресс IAC'06, Москва, 27-31 августа 2006 г. Тезисы докладов конгресса. С.237.

7. *Жуков Б.С., Василейский А.С., Железнов М.М., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И.* Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: «ООО «Азбука-2000», 2007. Вып.4. Т.1. С.222-228.