



Акционерное общество
«Научно-производственная корпорация
«Космические системы мониторинга,
информационно-управляющие и
электромеханические комплексы»
имени А.Г. Иосифьяна
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Расчет скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости бортовой оптико-электронной аппаратуры КА при орбитальной съемке планеты с использованием фундаментальных уравнений космической фотограмметрии в дифференциальном виде



Введение

В современной астрономии выделилось отдельное направление исследования: астрономо-геодезическое изучение и картографирование. Одними из задач такого направления являются:

1. Разработка способов координатной привязки результатов космических экспериментов к поверхности небесного тела и выполнение самой привязки изображения без данных об опорной информации;
2. Разработка содержания карт планет и спутников и способов отображения рельефа на них;
3. Разработка способов и методик построения опорных сетей на поверхности планет и спутников по космическим снимкам с борта КА.



Введение

Съемка участков поверхности планет бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА) накладывает определенные ограничения на процесс формирования изображения. Во время съемки с помощью набора страйпов маршрута съемки (МС) различных участков поверхности планет требует правильного учета следующих особенностей процесса орбитальной съемки:

1. КА движется по орбите вокруг некоторого небесного тела;
2. Небесное тело вращается в инерциальном пространстве;
3. Во время съемки КА должен совершать развороты вокруг собственных осей, изменяя тем самым свою ориентацию по некоторому закону движения, заложенному в полетном задании на съемку.



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости



а



б



в

Маршруты трассовой (а), с выравниванием (б) и площадной съемки (в) из нескольких маршрутов. При таких различных видах маршрутов съемки, соответственно, будут формироваться различные СДИ по полю фокальной плоскости, которые можно вычислить с большой точностью, зная закон управления СОС КА при съемке [3].



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Фундаментальное уравнение космической фотограмметрии в коллинеарном виде без учета масштабного коэффициента $\frac{1}{m} = \frac{\Delta_{ij}}{R_{ij}}$ записывается в виде:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{ij} &= -f_t \frac{U_{ij}}{W_{ij}}; \\ \tilde{y}_{ij} &= -f_t \frac{V_{ij}}{W_{ij}}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{ij} &= a_{11}\Delta X + a_{12}\Delta Y + a_{13}\Delta Z ; \\ V_{ij} &= a_{21}\Delta X + a_{22}\Delta Y + a_{23}\Delta Z ; \\ W_{ij} &= a_{31}\Delta X + a_{32}\Delta Y + a_{33}\Delta Z .\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_j - X_i ; \\ \Delta Y &= Y_j - Y_i ; \\ \Delta Z &= Z_j - Z_i ;\end{aligned}$$

ΔX , ΔY , ΔZ - разность координат между ц.м. КА и снимаемой точкой поверхности планеты



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Малые приращения координат места съемки за время $\tau_{\text{эксп}}$ определим, представляя фундаментальное уравнение космической фотограмметрии в линеаризованном виде:

$$d\tilde{x}_{ij} = A_x + B_x + C_x;$$

$$d\tilde{y}_{ij} = A_y + B_y + C_y;$$



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Параметры A_x, A_y определяют вклад в смещение точек изображения от параметров изменения углов ориентации КА за время $\tau_{\text{эксп}}$

$$A_x = \left(\frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial \Omega} \delta \Omega + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial J} \delta J \right);$$

$$A_y = \left(\frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial \Omega} \delta \Omega + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial J} \delta J \right).$$

Изменение параметров ориентации за время $\tau_{\text{эксп}}$ можно определить, зная закон управления СОС КА.



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Параметры B_x, B_y определяют вклад в смещение точек изображения от параметров изменения вектора состояния КА за время $\tau_{\text{ЭКСП}}$

$$B_x = \left(\frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial X_i} \delta X_i + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial Y_i} \delta Y_i + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial Z_i} \delta Z_i \right)$$

$$B_y = \left(\frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial X_i} \delta X_i + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial Y_i} \delta Y_i + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial Z_i} \delta Z_i \right)$$

Изменение вектора состояния за время $\tau_{\text{ЭКСП}}$ можно найти, решая уравнение Кеплера или используя интерполяцию координат КА.



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Здесь параметры C_x, C_y определяют вклад в смещение точек изображения от параметров изменения координат места съемки за время $\tau_{\text{эксп}}$.

$$C_x = \left(\frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial X_j} \delta X_j + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial Y_j} \delta Y_j + \frac{\partial \tilde{x}_{ij}}{\partial Z_j} \delta Z_j \right);$$

$$C_y = \left(\frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial X_j} \delta X_j + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial Y_j} \delta Y_j + \frac{\partial \tilde{y}_{ij}}{\partial Z_j} \delta Z_j \right).$$

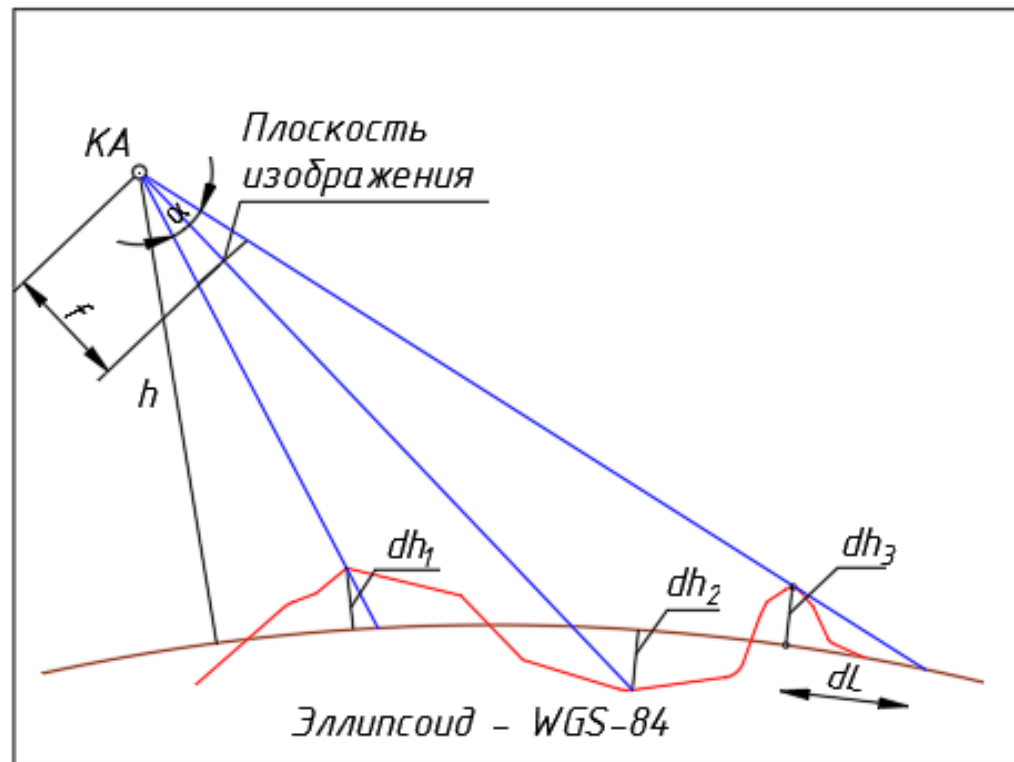
Изменение координат места съемки в ИСК можно определить, зная поворот поверхности планеты за время $\tau_{\text{эксп}}$. Такой поворот описывается матрицей поворота планеты.



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Изменение координат места съемки обусловлено не только вращением поверхности планеты, но и другими факторами. Так для наиболее точного оценивания СДИ необходимо учитывать изменение высоты места съемки над эллипсоидом за время формирования снимка. Влияние различия СДИ по полю ФП на протяжении МС отразится на снимке различными искажениями.

В случае отсутствия такого учета, смещения будут считаться постоянными на протяжении МС и фактически будут порождать искажения внутренней геометрии снятой сцены (страйпа), сводящиеся к взаимному смещению точек изображений объектов в разных направлениях.





Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

Для определения скоростей движения изображения в выбранной точки ФП по соответствующим осям полученные приращения координат точек снимка поделим на время экспозиции $\tau_{\text{эксп}}$:

$$V_x = \frac{d\tilde{x}_{ij}}{\tau_{\text{эксп}}};$$

$$V_y = \frac{d\tilde{y}_{ij}}{\tau_{\text{эксп}}}.$$



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

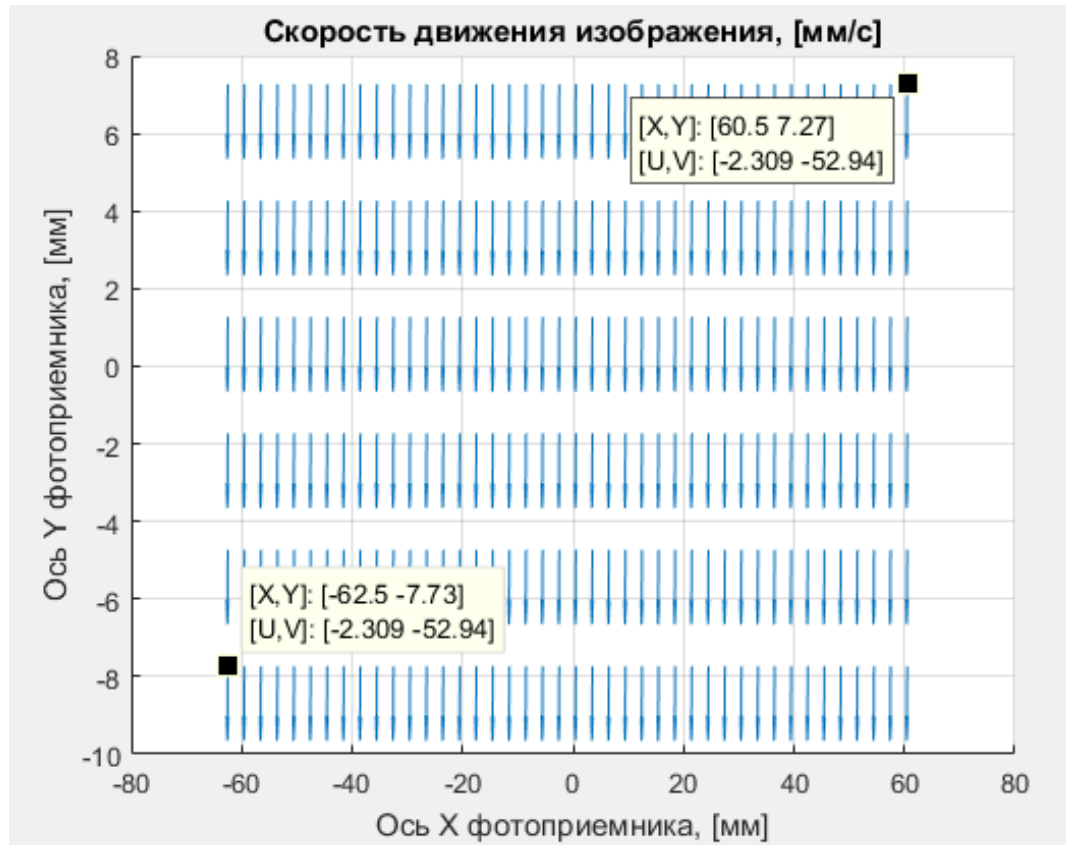


График визуализирующий векторы СДИ по полю фокальной плоскости ОЭА при угле крена 0 град.

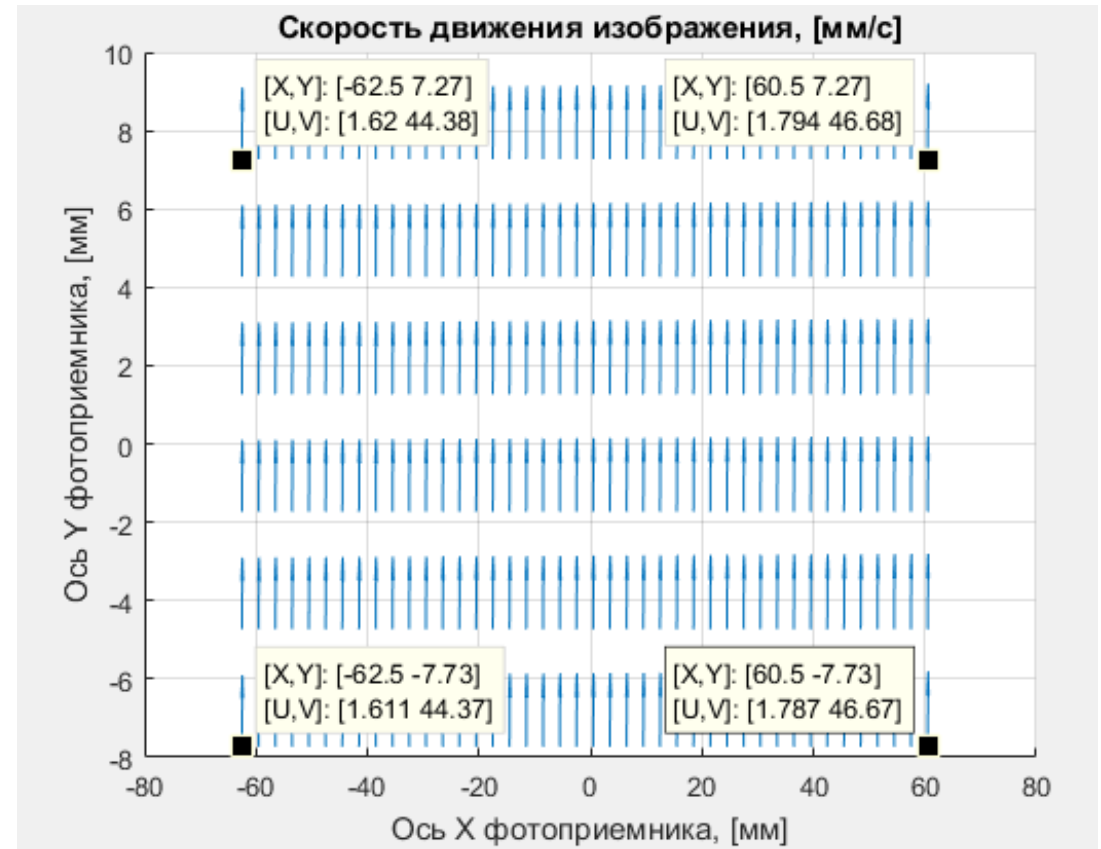


График визуализирующий векторы СДИ по полю фокальной плоскости ОЭА при угле крена 30 град.



Оценка скоростей движения изображения по полю фокальной плоскости

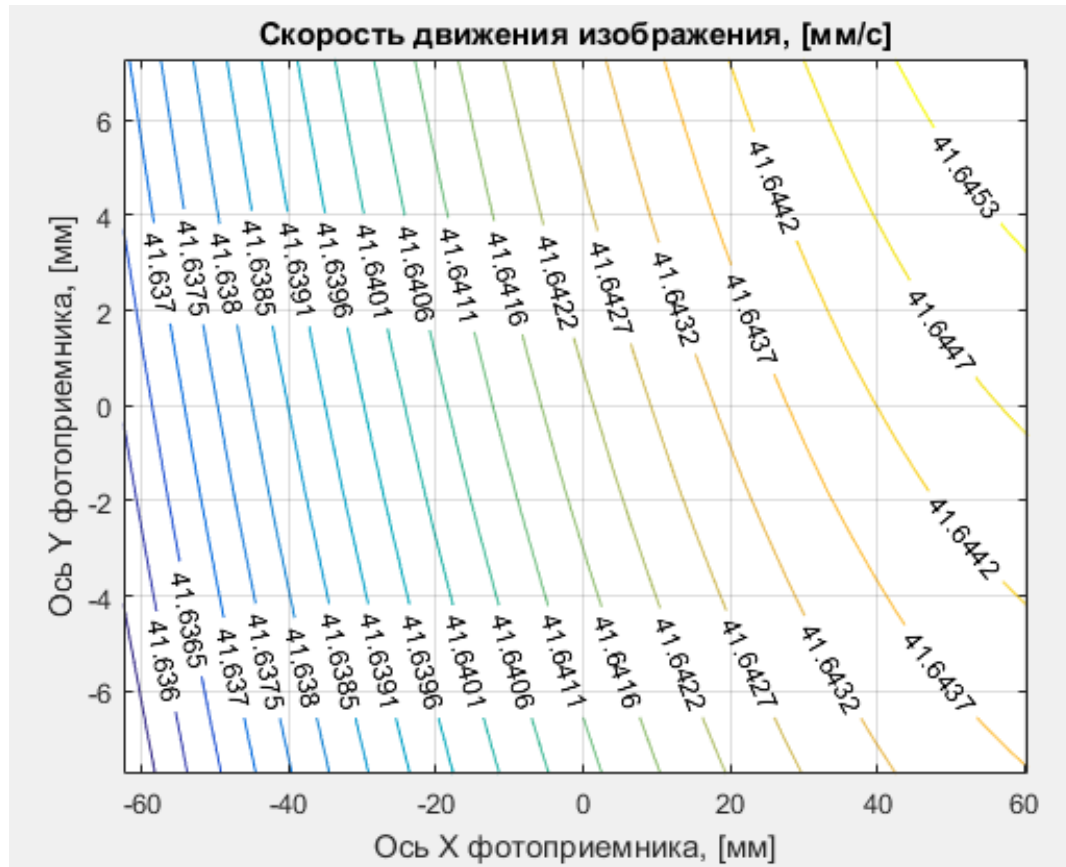


График визуализирующий векторы СДИ по полю фокальной плоскости ОЭА при угле крена 0 град.

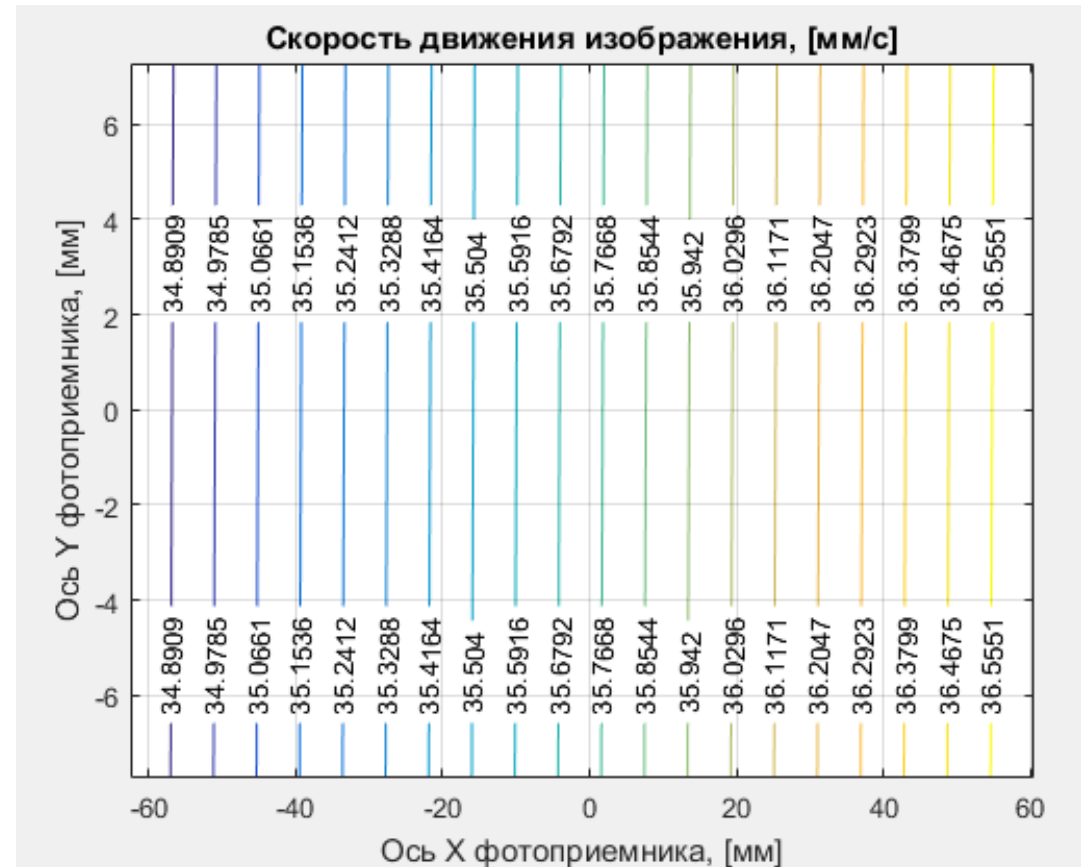


График визуализирующий векторы СДИ по полю фокальной плоскости ОЭА при угле крена 30 град.



Влияние отклонения фактического вектора СДИ от расчетного при восстановлении растра снимка

Недостаточно точный учет фактических векторов СДИ приводит к следующим факторам:

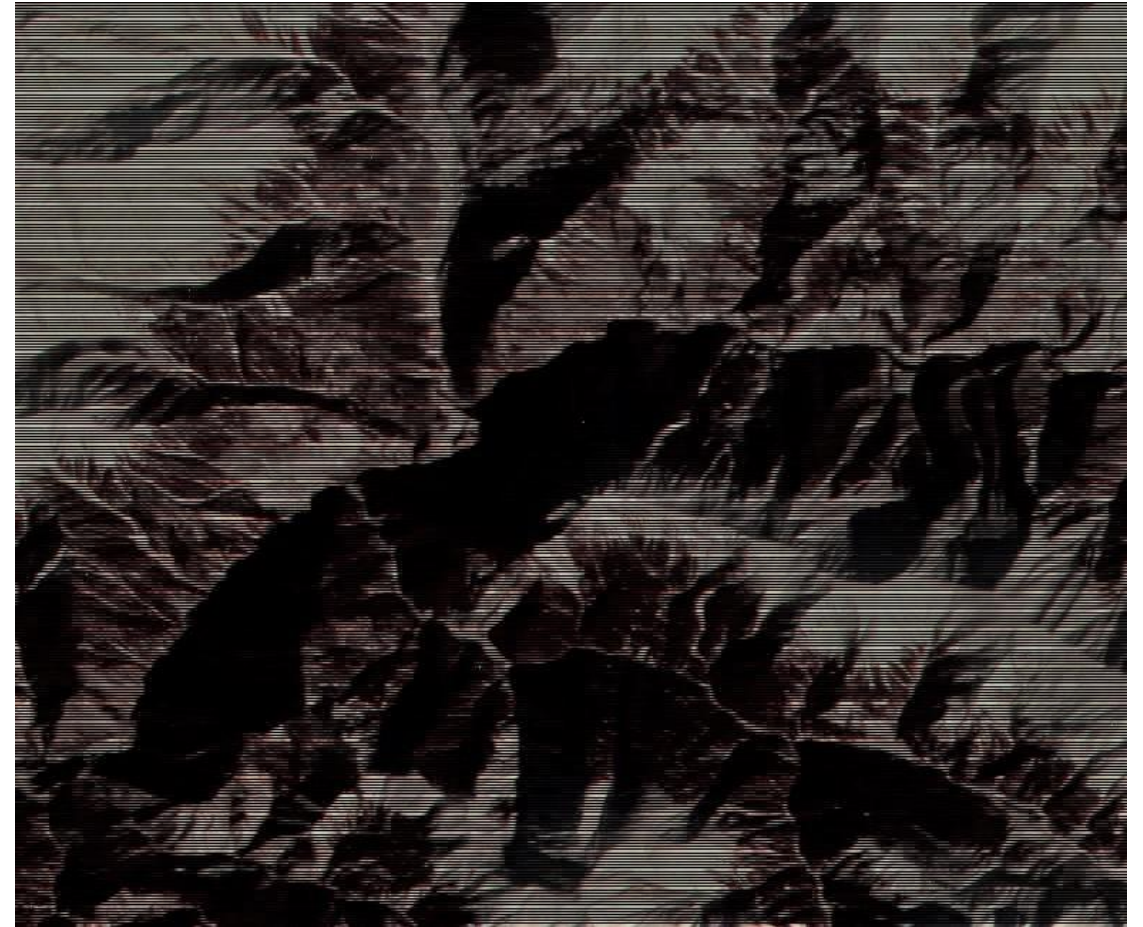
- Наложение строк или разрывы между строками сетки, которые непрямолинейны из-за кривизны снятой поверхности и перспективных искажений, что может породить периодические полосы на растре скана перпендикулярно вектору СДИ и соответствующее снижение функции передачи модуляции (ФПМ) изображения, в том числе, и из-за необходимости интерполяции тех яркостей, которые получены в пикселях ФПЗС;
- Накопленный разнонаправленный сдвиг объектов на изображении относительно их истинного взаимного положения – так называемая S-дисторсия или искажения взаимного положения объектов ландшафта на сканерном изображении;
- Уменьшение ФПМ (уменьшение числа верхних пространственных частот, т.е. контурности изображения) съемочной системы из-за роста функции рассеяния точки (ФРТ) и появления «смаза» изображения;



Влияние отклонения фактического вектора СДИ от расчетного при восстановлении растра снимка

Влияние недостаточно точного учета фактических векторов СДИ можно проиллюстрировать изображением на представленном рисунке.

Из рисунка видна характерная поперечная «полосатость» с ярко выраженным периодом.
(Вектор СДИ направлен снизу вверх)





Выводы

- На основе решения фундаментального уравнения космической фотограмметрии разработан алгоритм оценивания СДИ по полю фокальной плоскости, что дает возможность при расчете СДИ учитывать не только движение КА по орбите, вращение твердого небесного тела, но и влияние различных высот объектов съемки в поле регистрации снимка. Это становится особенно значимым для верного восстановления раstra при съемке резкоменяющегося ландшафта.
- На основании расчетов с использованием точного алгоритма расчета фактических СДИ по полю ФП возможно:
 - А) оптимальное планирование съемок планеты с точки зрения качества ее изображения;
 - Б) вычисление и обработка на борту оптимальных СДИ по полю ФП БОЭА;
 - В) достоверное восстановление исходного набора кодов яркости полученного изображения планеты к облученности от звезды или излучения самой поверхности планеты без знания опорных информации о поверхности планеты;
 - Г) проецирование (сэмплинг) кодов яркости при восстановлении изображения планеты.



Список литературы

1. М.С. Урмаев. Космическая фотограмметрия. М.: «Недра», 1989 г.
2. Батраков А.С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига изображения при съемке земной поверхности. – Исследование Земли из космоса, 1989, № 4, с. 99 – 106.
3. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке земли. Известия Самарского научного центра РАН, т. 9, №3, 2007.
4. Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, В.Я. Геча, М.Ю. Жиленев, Казанцев С.Г. Основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА // Вопросы Электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - 2018.- Т.160.- № 5. - С.3-19.
5. Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты. Российский технологический журнал 2018. Том 6 № 4.
6. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой. /Телекоммуникации (Telecommunications) -М.: № 7, 2011.
7. K. Jacobsen. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation jacobson@ipi.uni-hannover.de. Commission I, WG I/4.
8. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разрешения. Научные ведомости БГУ. – № 8(179). – 2014. – С. 189-200.



Окончание доклада

Спасибо за внимание!

Геча Владимир Яковлевич volikgecha@gmail.com
Жиленев Михаил Юрьевич
Горчаков Сергей Юрьевич