

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

Реализация сверхразрешения на космическом изображении на основе восстановления цифровой модели рельефа зондируемого ареала

Винтаев В.Н. (1), Жиленев М.Ю. (2), Ушакова Н.Н. (1)

(1) Белгородский университет кооперации, экономики и права, Белгород, Россия

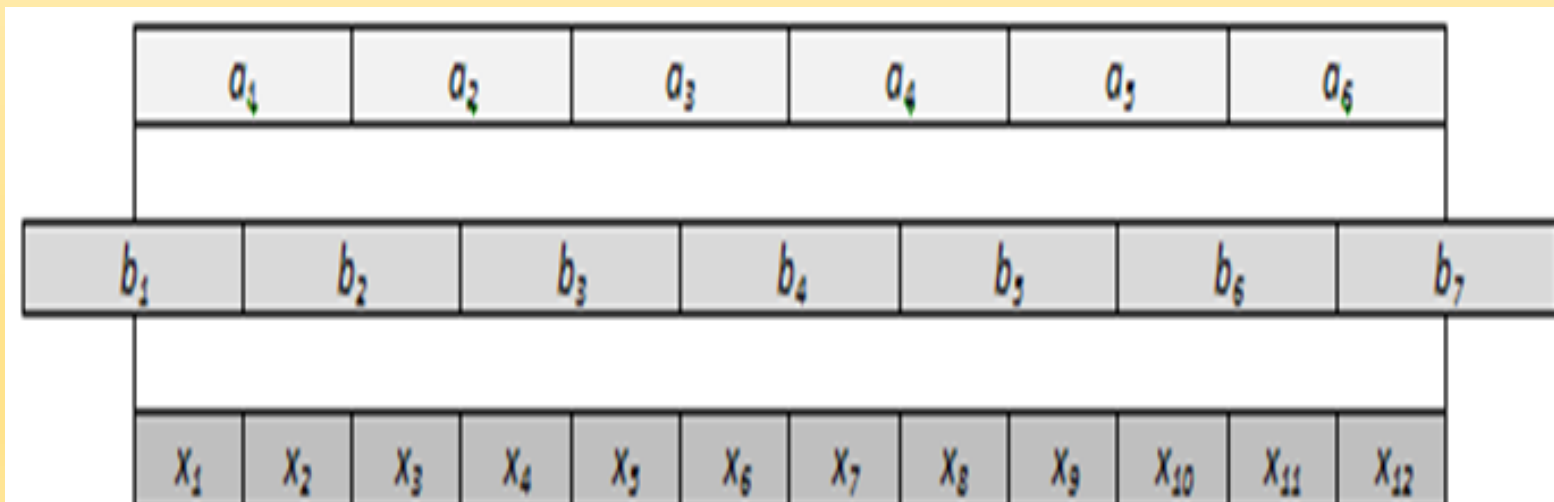
(2) АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», Москва, Россия

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-07-00697 «Разработка основ системного анализа и моделирования коррекции резкости космических изображений сверхвысокого разрешения на базе модернизации теоретико-типовых математических и семантических подходов для прогноза и реализации максимально возможных характеристик по пространственному разрешению» и научного проекта № 18-07-00201 «Разработка фундаментальных основ мягкого системного анализа и моделирования систем формирования и верификации космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения по данным с группировок орбитальных аппаратов в неопределенных и предельно допустимых условиях орбитальных съемок».

Опробован метод получения изображения со сверхвысоким разрешением минуя методы использования сдвинутых пикселей (субпикселей) на параллельных оптических системах, реализуемых на дублирующих полетах аппаратов и других методах дополнительной съемки исследуемого ареала. Приведена схематичная реализация технологии сверхвысокого разрешения для двух выделенных строк, сдвинутых субпиксельно (на половину апертуры пиксела) изображений. Приведенная схема поддерживается однозначностью решения системы уравнений для яркостей искомых пикселей

сверхвысокого разрешения по отделенным цветовым каналам.

Схематичная реализация сверхвысокого разрешения в одномерном варианте:



Значения обозначений приведенной схемы

- Элементы a_1 - a_6 , b_1 - b_7 соответствуют расположению и значениям яркостей в параллельном (или раздвоенном – условно параллельном) световом потоке при формировании двух изображений одного и того же ареала – пикселей чувствительного транспаранта (или приборов с зарядовой связью (ПЗС)),
- x_1 - x_{12} – это виртуальные пикселы, структурирующие в модели сверхвысокого разрешения световой поток на транспарант (или ПЗС) с удвоенной дискретизацией, значения яркости которых необходимо вычислить.
- Выход b_1 и b_7 за пределы апертуры оптической системы на рисунке означает, что обеспечена их полная засветка. Таким образом, формируется полностью определенная система линейных уравнений для нахождения яркостей пикселей восстанавливаемого изображения в каждом из цветовых каналов:

$$\begin{cases} x_{2i-1} + x_{2i} = a_i (i = 1, 2, \dots, 6) \\ x_1 = \frac{b_1}{2} \\ x_{2j} + x_{2j+1} = b_k (j = 1, 2, \dots, 5; k = 2, 3, \dots, 6) \end{cases} \quad (1)$$

Основные аспекты предлагаемого процесса

- На сформированном космическом изображении высокого разрешения осуществляется технология сверхвысокого разрешения (и коррекция резкости и поддерживаемого пространственного разрешения) с использованием модели рассеяния светового потока на цифровой модели рельефа зондируемого ареала без привлечения физически реализуемых дополнительных каналов дистанционного зондирования.
- Технология сверхвысокого разрешения заимствована из широко опубликованной технологии для спутника класса Spot и построена на решении для формируемых пикселей систем линейных уравнений с матрицей, рождающейся парциальным наложением сдвинутых субпиксельно нескольких изображений заведомо худшего разрешения.
- Использование цифровой модели рельефа (ЦМР) исследуемого ареала, восстановленной по теням на его космическом изображении высокого разрешения в модели рассеяния зондирующего излучения, падающего на ареал с углами, определенными также по теням на том же предъявленном космическом изображении (или по углам места Солнца, отмеченным в паспорте сформированного снимка), позволяет представить исходное изображение с увеличенной резкостью и, соответственно, поддерживаемым разрешением без привлечения дополнительных материалов орбитальных съемок (по методу организации сверхвысокого разрешения).
- Формирование и выбор пикселей осуществляется из результата функционирования модели рассеяния, идентичных пикселям исходного изображения по апертурам, но сдвинутых относительно каждого пикселя на исходном изображении по горизонтали и вертикали на половину или долю их апертуры, что соответствует организации классической схемы реализации сверхвысокого разрешения.

Преимущества предлагаемого подхода

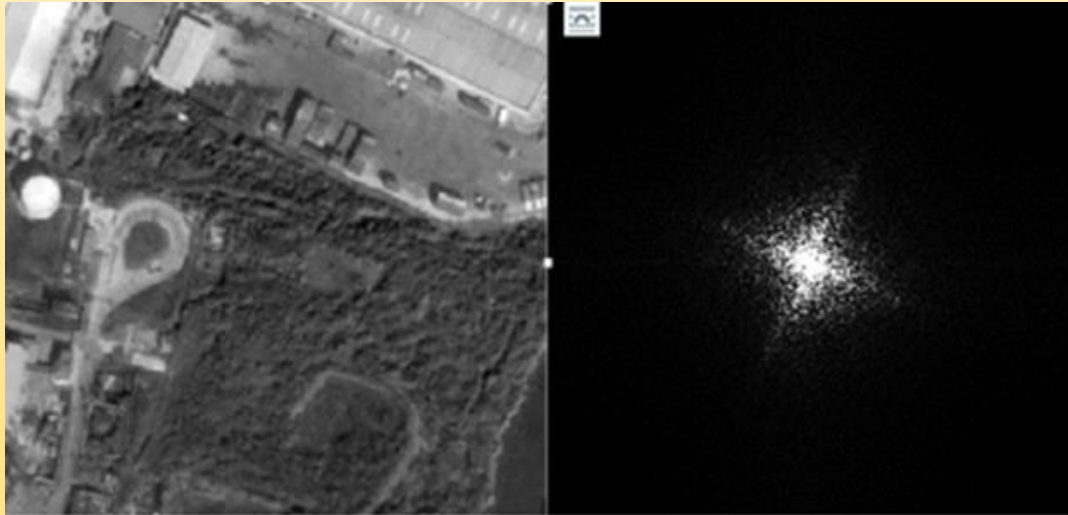
- Использование модели рассеяния на цифровой модели рельефа ареала при индустриальном применении в коррекции резкости сулит эффект экономии в сотни миллионов рублей из-за отказа от запусков дополнительных космических аппаратов.
- Выполненное моделирование на материалах с аппаратов Ikonos, OrbView, QuickBird, Ресурс ДК показало прагматическую ценность теоремы Д.В. Агеева (1957 год) и Л.М. Финка (1984 год) о том, что у произвольной функции с финитным спектром существуют участки ограниченной длительности, на которых она может меняться сколь угодно быстро. В литературе нет сведений о связи спектра изображений с верхней модой, определяющей это «сколь угодно быстро» для возможного применения теоремы Котельникова о дискретизации самого изображения.

Недостатки предлагаемого подхода

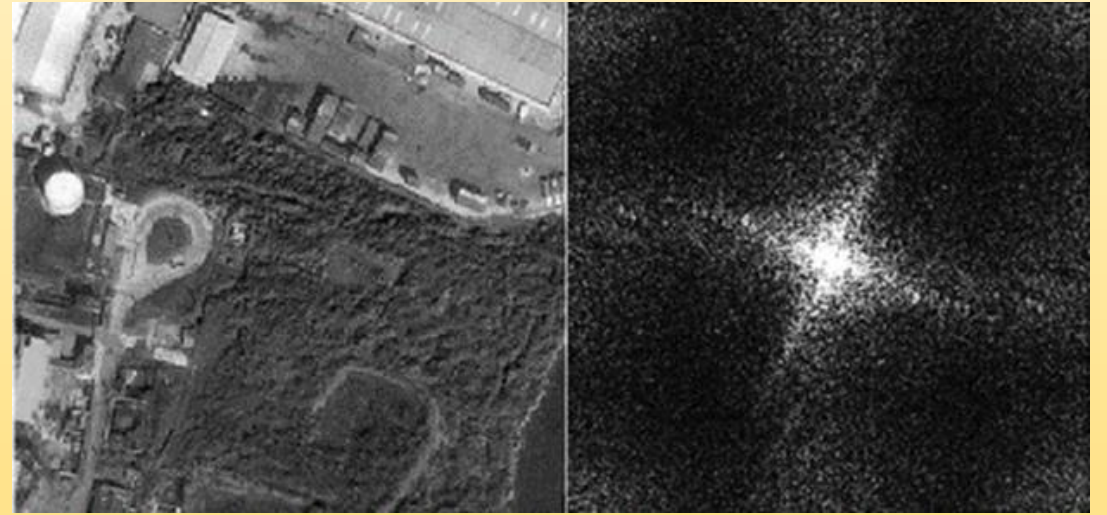
- После синтеза изображения по модели ЦМР необходимо кроме фильтрации порождаемого шума, коррекции контраста и резкости выполнить процедуры фотограмметрической обработки одиночного снимка повторно, согласовываясь с опорными точками исходного предъявленного изображения.
- Реально достигаемое разрешение при этом ищется из решения задачи оптимальной фильтрации при заданном (позволительном) пороге среднеквадратичного остаточного шума, который в модели рассеяния на ЦМР в области высших мод пространственно-частотных спектров изображений может принимать значения, сравнимые с амплитудой регулярных составляющих.
- При использовании модели рассеяния излучения в коррекции резкости увеличение значения резкости вызывает многократное увеличение среднеквадратичного шума на итоговом изображении.

Пример реализации модели рассеяния падающего излучения на методе Кирхгофа на ЦМР, восстановленной по приведенному изображению

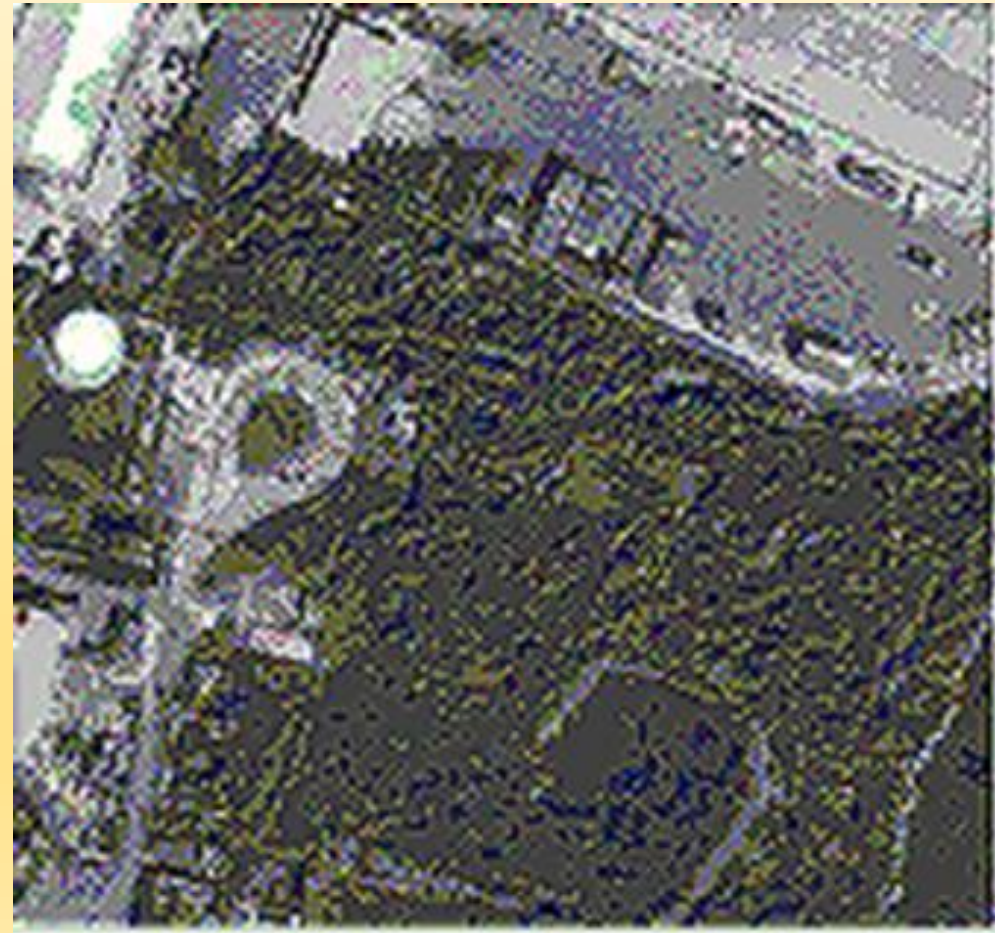
Исходное изображение
QuickBird_Havana_industry_image_chip-0.6 m и
его ПЧС



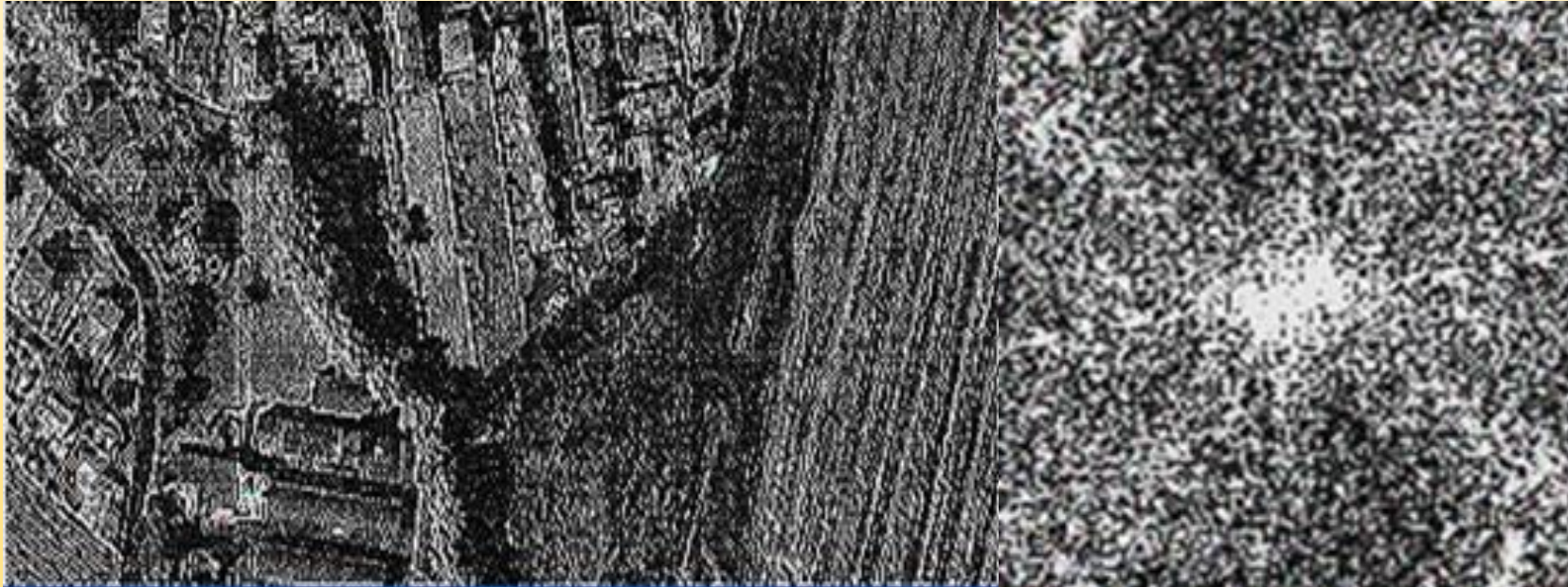
Это же изображение с ПЧС при использовании
метода Кирхгофа для вычисления
коэффициента коррекции операции улучшения
резкости



Пример результирующего изображения, синтезированного на результатах моделирования рассеяния на ЦМР после коррекции геометрии, нормализации яркости, контраста, динамического диапазона и оптимальной фильтрации шумовой составляющей



Изображение с аппарата Ресурс-ДК и его ПЧС после выполнения процедур сверхвысокого разрешения с использованием сдвинутых субпиксельно изображений, полученных на модели рассеяния излучения на восстановленной ЦМР ареала.



Литература:

1. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения. Саарбрюккен, Германия: Lambert Academic Publishing, 2018. 208 с.
2. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Геча В. Я., Жиленёв М. Ю., Казанцев С. Г. Основные источники снижения качества изображений земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА//Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. С. 3-19.
3. [Свиридов К.Н.](#), [Тюлин А.Е.](#), [Волков С.А.](#) Реальное инструментальное разрешение на местности зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения // Информация и космос, 2019. № 1.С. 150-159.
4. [Тюлин А.Е.](#), Свиридов К.Н. Информационные и финансовые потери несовершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и космос, 2020. № 1. С. 152-160.