



Двадцать четвертая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

Метод яркостной коррекции радиолокационных
изображений на этапе предварительной
обработки снимков

ктн В.В. Зайцев, Г.В. Сирож, К.С. Кудинов



Актуальность темы

2

КА «Кондор-ФКА» на орбите

запуски 27.05.2023 и 30.11.2024,
космодром Восточный

2029–2030

запуск КА № 3 и № 4

по заявлению НПО машиностроения
(январь 2026 г.)

> 7 трлн ₽

нацпроект «Космос» до 2036 г.

утверждён в 2025 г.; ФП «Спутниковая
связь и наблюдение за Землёй»

Почему радиолокационным снимкам необходима радиометрическая коррекция

1

Всепогодность и рост объёма данных

РСА S-диапазона снимает независимо от освещённости и облачности;
разрешение — до 1 м, объём одного снимка — единицы гигабайт

2

Огромный динамический диапазон

79,4 дБ на фрагменте исследованного снимка ($\approx 10^8$ раз) при 8-битном формате отображения — 256 уровней

3

Остаточные радиометрические искажения

неравномерность яркости по дальности сохраняется даже после штатной обработки в наземном комплексе

Проблема

Существующие программы обработки данных ДЗЗ ориентированы на оптические снимки и не учитывают физику формирования радиолокационного сигнала — пользователь вручную подбирает параметры нелинейного преобразования для каждого снимка.



Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы — повышение достоверности дешифрирования радиолокационных изображений за счёт разработки метода и программного средства радиометрической коррекции, включающего выравнивание яркости по дальности и адаптивное сжатие динамического диапазона с количественной оценкой потерь информации.

Задачи:

- 1 анализ источников радиометрических искажений РЛИ и существующих методов коррекции;
- 2 разработка модели выравнивания яркости по дальности на основе медианного профиля;
- 3 разработка метода оценки распределения интенсивности и тонального преобразования;
- 4 обоснование безэталонных показателей потерь информации;
- 5 программная реализация, эксперименты на снимках КА «Кондор-ФКА» и сравнение с известными программными средствами.

Объект исследования

радиолокационные изображения земной поверхности, полученные РСА космического базирования

Предмет исследования

методы и алгоритмы радиометрической коррекции и сжатия динамического диапазона РЛИ



Как радиолокатор (РСА) получает снимок

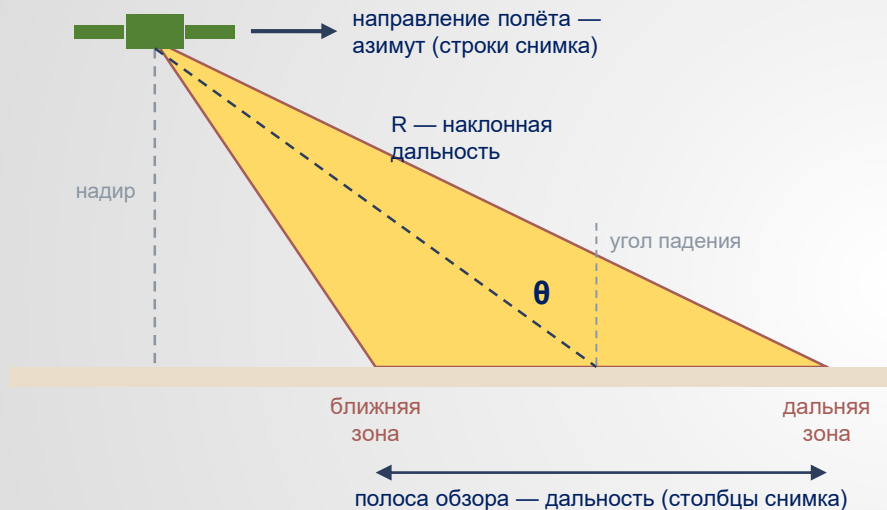


Рисунок 1 – геометрия боковой съёмки РСА

1

Боковой обзор

Спутник излучает радиоимпульсы вбок от трассы и принимает эхо. Строки снимка — направление полёта (азимут), столбцы — расстояние до цели (наклонная дальность).

2

Разрешение по дальности

Длинный ЛЧМ-импульс сжимается согласованным фильтром — разрешение задаёт ширина спектра B , а не длительность импульса.

3

Разрешение по азимуту

Пока точка в луче, сигнал накапливается — апертура «синтезируется» длиной в километры, и разрешение не зависит от дальности.

$$\delta_r = \frac{c}{2B}, \quad \delta_a \approx \frac{L_a}{2}$$

B — ширина спектра импульса; L_a — длина антенны



Виды и этапы обработки радиолокационной информации



Радиометрическая и геометрическая коррекция

Радиометрическая исправляет значения яркости, чтобы они отражали поверхность, а не аппаратуру. Геометрическая исправляет положение пикселей на местности.



Статистические свойства 1: спекл

Почему снимок зернистый

В элементе разрешения — сотни мелких отражателей. Их волны складываются со случайными фазами, поэтому даже однородное поле выглядит как «шум».

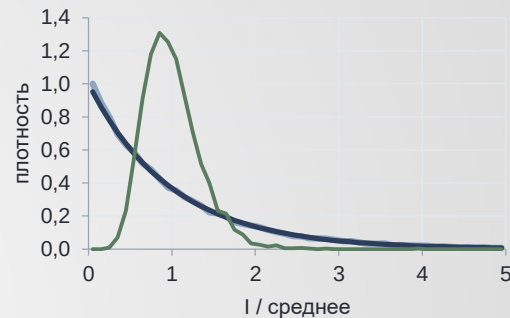
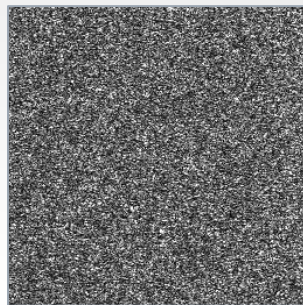
$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right), \quad \sigma_I = \langle I \rangle$$

Закон Гудмена: интенсивность распределена экспоненциально, разброс **равен** среднему — по одному пикселю поверхность не оценить.

$$\frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \frac{1}{\sqrt{L}}$$

усреднение L отсчётов снижает разброс, но ухудшает разрешение

однородное поле, 256 × 256 пикс.



- снимок, $L = 1$
- теория: экспонента
- после усреднения 4×4 пикс.

Рисунок 3 – однородный участок снимка: данные совпадают с теорией



Статистические свойства 2: диапазон яркостей

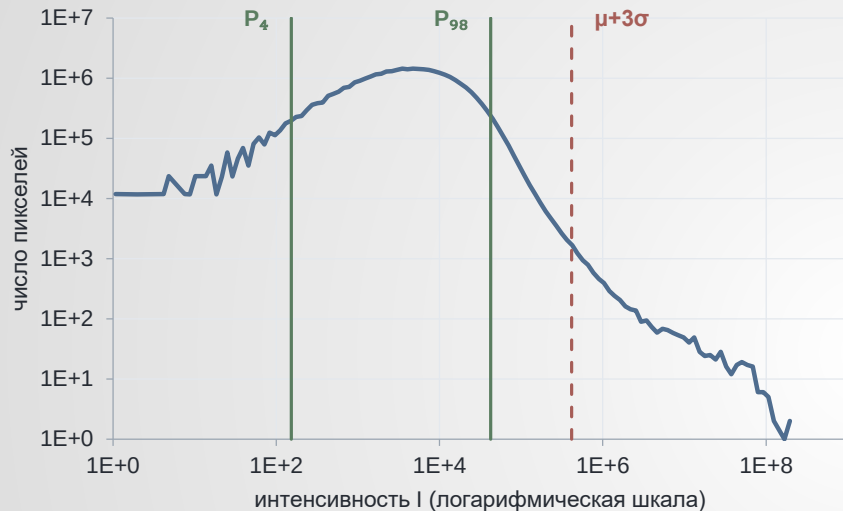


Рисунок 4 – гистограмма интенсивности снимка «Кондор-ФКА»
(логарифмические шкалы)

Рядом — вода, поля и металл

Гладкая вода почти не отражает сигнал, а здания и металлоконструкции (угловые отражатели) ярче её в миллионы раз.

$$D = 10 \lg \left(\frac{I_{max}}{I_{min}} \right)$$

Экран и ГИС показывают 8 бит — 256 уровней, а это всего ≈ 24 дБ при линейной шкале.

«Тяжёлый хвост»: редкие яркие пиксели завышают среднее и СКО, поэтому правило $\mu + k\sigma$ ставит границу почти на самом хвосте.

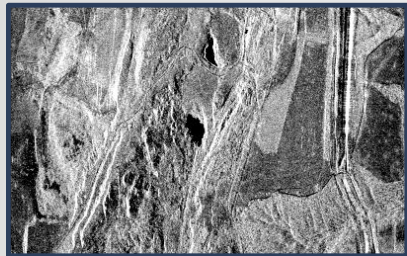
Вывод для метода

Фон подчиняется экспоненциальному закону, яркие точечные и сосредоточенные объекты стремятся к нормальному распределению. Прямое линейное растяжение гистограммы ведёт либо к потере деталей на тёмных участках, либо к насыщению ярких целей.



Статистические свойства 3: модель искажений

$\sigma^0(x, y)$ — поверхность
(то, что нужно увидеть)



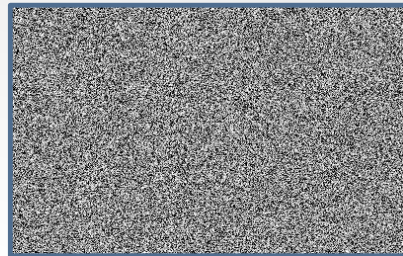
×

$G(x)$ — аппаратура и геометрия
(зависит только от дальности)



×

$n(x, y)$ — шум
(случайный, среднее = 1)



=

$I(x, y)$ — что записано
в снимке

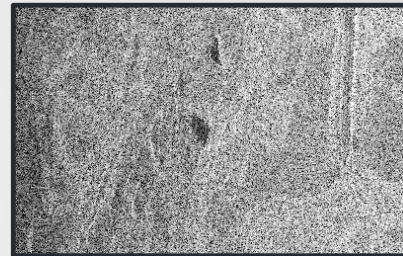


Рисунок 5 – модель формирования яркости (сцена — фрагмент снимка «Кондор-ФКА», профиль $G(x)$ — измеренный)

$$I(x, y) = \sigma^0(x, y) \cdot G(x) \cdot n(x, y)$$

$$10 \lg I = 10 \lg \sigma^0 + 10 \lg G(x) + 10 \lg n$$

Множитель $G(x)$ одинаков для всех строк одного столбца, а сцена и шум по строкам меняются случайно. Медиана по многим строкам «усредняет» сцену и шум — остаётся форма $G(x)$.

В децибелах произведение превращается в сумму — $G(x)$ можно найти подгонкой гладкой кривой.



От свойств снимка — к требованиям к методу

Свойство снимка	К чему приводит	Как учитываю в методе
Неравномерность по дальности $G(x)$	края полосы темнее; уровни 8 бит тратятся на спад яркости	Шаг 1: оцениваю $G(x)$ и делю на него до перевода в 8 бит
Спекл: разброс = среднему	отдельные пиксели ненадёжны	медиана по 700 строкам; статистика по гистограмме
Огромный диапазон, тяжёлый хвост	$\mu + k\sigma$ завывает границу — снимок тёмный	Шаг 2: границы по перцентилям P_4 и P_{98}
Глаз реагирует на относительные изменения	линейная шкала отдаёт уровни ярким целям	Шаг 3: логарифмическая кривая + γ
Эталонного 8-битного снимка нет	PSNR и SSIM неприменимы	Шаг 4: безэталонные показатели η и U
Объём снимка — гигабайты	не помещается в память целиком	тайлы, два прохода, параллельные процессы

Существующие способы перевода в 8 бит решают эти задачи только по отдельности — рассмотрим их.



Предлагаемый метод: идея и порядок работы

Идея: автоматическая коррекция по глобальным статистикам самого снимка — без ручного подбора параметров. Убрать затенение по дальности, задать границы диапазона с учётом статистической модели сигнала, сжать диапазон нелинейной кривой ($\gamma < 1$), согласующей распределение яркостей с откликом монитора, и оценить потери.



Вход: комплексный снимок уровня 1 (CEOS, GeoTIFF, ENVI). **Выход:** 8-битный GeoTIFF + параметры для обратного пересчёта + отчёт.

Снимок обрабатывается тайлами за два параллельных прохода: шаг 1 читает 700 строк, шаги 2 и 3 — по одному проходу, шаг 4 считается попутно.



Программная реализация: Radar Image Processor

Архитектура

- Python 3.11; GDAL — чтение CEOS, GeoTIFF, ENVI, NITF; NumPy — вычисления; PyQt5 — интерфейс;
- ядро не зависит от интерфейса — возможен запуск из командной строки и пакетный режим;
- пул процессов: каждый сам читает свой тайл, между процессами передаются только гистограммы и готовые 8-битные блоки;
- результат — тайловый GeoTIFF с пирамидами, параметрами обработки и отчётом CSV/JSON.

58,5 с

обработка снимка
2,2 ГБ
(127,1 с в 1 процессе)

2,17×

ускорение на 4 ядрах
(Intel Core i3)

≈ 1 ГБ

пиковая память —
не зависит от размера
снимка

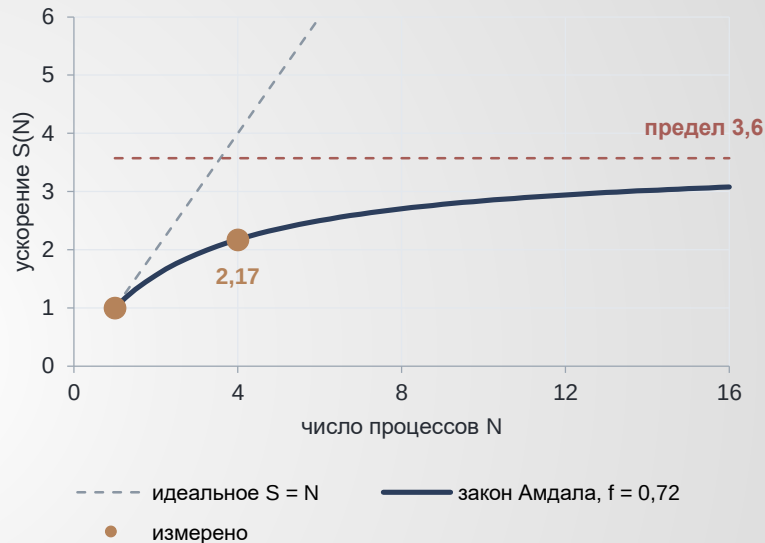


Рисунок 10 – ускорение: теория и измерения

Ускорение ограничено записью результата: файл пишет один процесс (закон Амдала, доля параллельной части $\approx 0,72$).



Результаты: использование диапазона и влияние γ

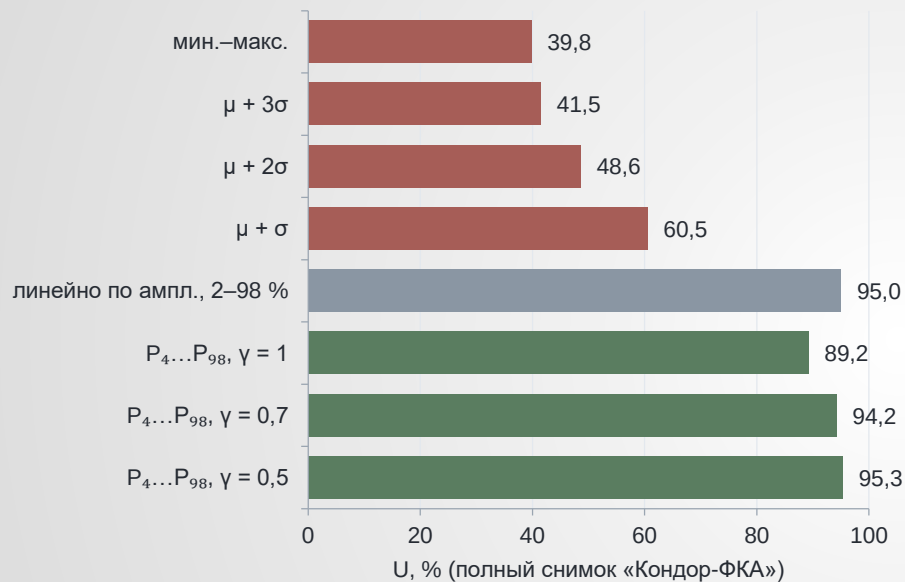


Рисунок 13 – коэффициент U на полном снимке

Рекомендуемое значение для визуального дешифрирования — $\gamma = 0,5$ – $0,7$: заняты все 255 кодов.

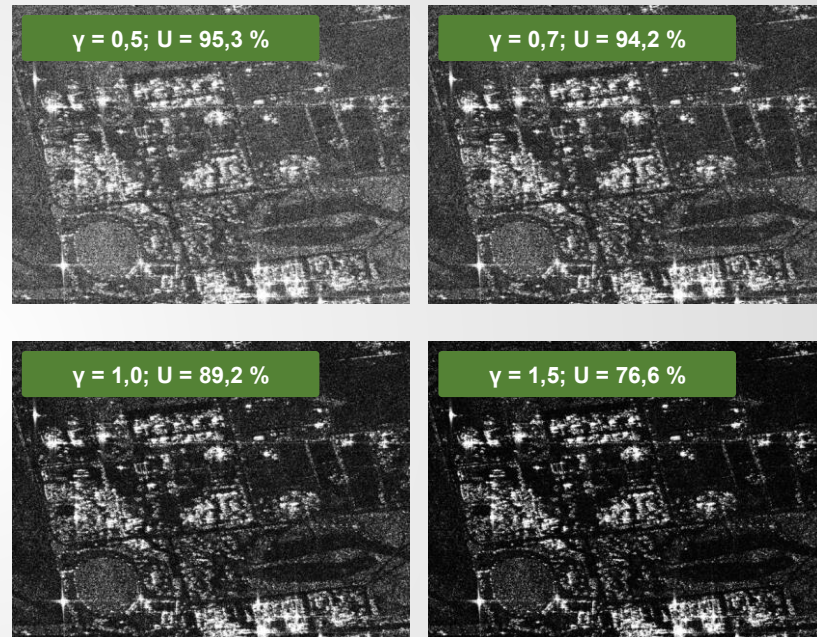


Рисунок 14 – один фрагмент при разных γ



Результаты: визуальное сравнение

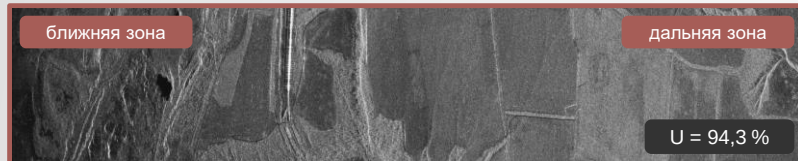
а) линейно, мин.–макс.



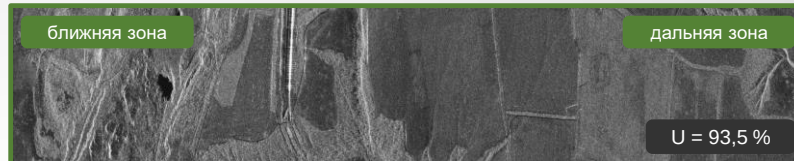
б) логарифм, граница $\mu + 3\sigma$



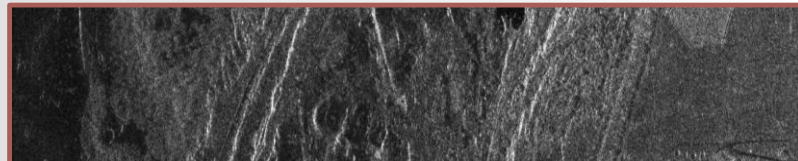
в) линейно по амплитуде, 2–98 % — без выравнивания



г) предложенный метод, $\gamma = 0,7$ — с выравниванием



в) крупно, ближняя зона: детали «тонут» в тени



г) та же область после выравнивания: детали читаются

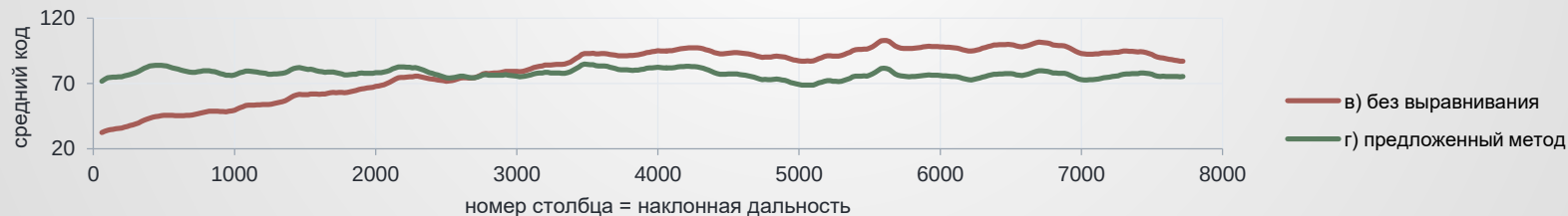
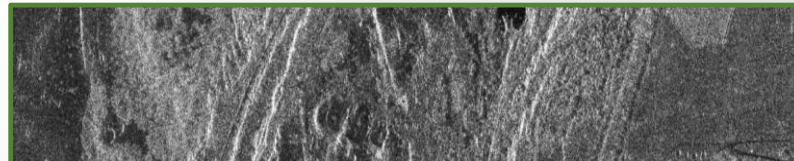


Рисунок 15 – снимок «Кондор-ФКА» 111_1: полоса на всю ширину обзора и крупный фрагмент ближней зоны



Заключение

- 1 Разработан метод радиометрической коррекции РЛИ: обратимое выравнивание яркости по дальности, оценка распределения по логарифмической гистограмме, перцентильное отсечение с логарифмической кривой, безэталонные метрики.
- 2 На снимках «Кондор-ФКА» выявлено и компенсировано остаточное затенение 0,73–2,61 дБ; неравномерность снижена в 2,4–4,2 раза.
- 3 Использование 8-битного диапазона — 89,2–95,3 % против 39,8–60,5 % у известных способов; ошибка перцентилей $\leq 0,73$ %.
- 4 Программа Radar Image Processor обрабатывает снимок 2,2 ГБ за 58,5 с при памяти ≈ 1 ГБ; в отличие от SNAP, QGIS и PHOTOMOD Radar выравнивает яркость по самому снимку и оценивает потери.

Практическая значимость

метод исключает ручные операции при подготовке РЛИ к дешифрированию и повышает оперативность обработки; рекомендуется для создания равномерных по яркости мозаичных покрытий из разнородных радиолокационных данных.

Направления развития

учёт геометрии съёмки в модели профиля; спекл-фильтрация с перекрытием тайлов; автоматический подбор P_{low} , P_{high} , γ ; параллельная запись результата.



Литература

Источник	Применение в работе
1. Goodman J.W. Some fundamental properties of speckle // Journal of the Optical Society of America. — 1976. — Vol. 66, № 11. — P. 1145–1150.	Статистика спекла: экспоненциальный закон интенсивности
2. Oliver C., Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. — Boston; London: Artech House, 1998.	Статистические модели РЛИ, многовзглядовая обработка
3. Коберниченко В.Г., Иванов О.Ю., Зраенко С.М. и др. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты: учеб. пособие / под общ. ред. В.Г. Коберниченко. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 168 с.	Этапы и практика обработки данных ДЗЗ
4. Коберниченко В.Г., Иванов О.Ю., Сосновский А.В. Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли: лабораторный практикум. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 64 с.	Предварительная обработка и визуализация РЛИ



Спасибо за внимание