

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.7 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.35.45 EDN QFDОНА

Экспериментальные подтверждения априорных оценок
инструментального и реального линейного
пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

К. Н. Свиридов, д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г. А. Ерохин, к. т. н., contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен российский критерий РКС оценки линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Показано, что критерий РКС обладает свойством априорной оценки минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Для подтверждения этого свойства критерия РКС использованы экспериментальные данные системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН). Сравнения экспериментальных данных линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{э}}$ с предсказанными критерием РКС данными инструментального линейного пространственного разрешения $R_{\text{РКС}}$, во-первых, подтвердили, что критерий РКС дает априорную оценку минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{РКС}}$, и, во-вторых, дали возможность определить средний коэффициент влияния внешних факторов, равный $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,3$ раз, знание которого позволило предсказать реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{н}}$ по предсказанному критерием РКС инструментальному линейному пространственному разрешению $R_{\text{РКС}}$ как $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{н}} = R_{\text{РКС}} \times K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}}$ и подтвердить этот прогноз экспериментом.

Ключевые слова: критерий РКС, прогноз инструментального разрешения, экспериментальное подтверждение прогноза, коэффициент влияния внешних факторов, прогноз и подтверждение реального разрешения

Experimental Confirmation of A priori Estimates
of Instrumental and Real Linear Spatial Resolution
of Earth Remote Sensing Satellites on the Ground

K. N. Sviridov, Dr. Sci. (Engineering), professor, contact@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. A. Erokhin, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The Russian Space Systems (RSS) criterion for estimating the linear spatial resolution of Earth remote sensing (ERS) satellites on the ground is considered. It is shown that the RSS criterion has the property of a priori estimation of the minimum (instrumental) linear spatial resolution of ERS satellites on the ground. To confirm this property of the RSS criterion, experimental data from the Satellite Validation Observation System (SVOS) were used. Comparisons of the experimental data of the linear spatial resolution of ERS satellites on the ground, $R_{\text{LRG}}^{\text{e}}$, with the predicted data of the instrumental linear spatial resolution of ERS satellites on the ground by the RSS criterion, R_{RSS} , firstly confirmed that the RSS criterion provides an a priori estimate of the minimum (instrumental) linear spatial resolution of ERS satellites on the ground, and secondly allowed us to estimate the average coefficient of the influence of external factors, $C_{\text{IEF}}^{\text{a}} = 1.3$ times, knowledge of which made it possible to predict the average real linear spatial resolution of ERS satellites on the ground, $R_{\text{LRG}}^{\text{p}}$, based on the predicted instrumental linear spatial resolution by the RSS criterion, R_{RSS} , as $R_{\text{LRG}}^{\text{p}} = R_{\text{RSS}} \times C_{\text{IEF}}^{\text{a}}$, and to confirm this prediction experimentally.

Keywords: RSS criterion, prediction of instrumental resolution, experimental confirmation of prediction, coefficient of the influence of external factors, prediction and confirmation of real resolution

Введение

В 2017 году в работе [1] был предложен российский критерий РКС оценки инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. В результате исследований, проведенных в АО «Российские космические системы» [2], показано, что критерий РКС дает априорную оценку минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Свойство критерия РКС априорно оценивать (предсказывать) минимальное (инструментальное) линейное пространственное разрешение цифровых КА ДЗЗ на местности является чрезвычайно важным, так как позволяет потребителям данных ДЗЗ объективно оценивать потенциальные возможности тех или иных КА ДЗЗ для решения конкретных задач специального, двойного и/или гражданского назначения.

Подтвердим это свойство критерия РКС экспериментами [3, 4], а сравнивая экспериментальные данные с предсказанными, определим средний коэффициент влияния внешних факторов, позволяющий по априорным оценкам инструментального разрешения предсказывать реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности.

Априорные оценки инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

Технические характеристики исследуемых в [3, 4] КА ДЗЗ и априорно предсказанные критерием РКС значения их минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения на местности, рассчитанные по формуле $R = 2dH/F$ [1], представлены в табл. 1.

Критерием РКС мы получили априорные оценки (прогноз) значений минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения на местности КА ДЗЗ, исследуемых в [3, 4]. Ранее аналогичный прогноз инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ «Ресурс-П» на местности, равный $R_{\text{РКС}} = 1,43$ м,

был дан в [1], где впервые был предложен и описан критерий РКС.

Очевидно, что реальные значения линейного пространственного разрешения исследуемых КА ДЗЗ на местности будут больше предсказанных выше величин инструментального линейного пространственного разрешения в силу влияния внешних факторов, таких как атмосферные искажения, смаз изображений и др., приводящих к размытию изображения и увеличению реального линейного пространственного разрешения. Подтвердим это экспериментами [3], показав, что предсказанные (табл. 1) значения инструментального линейного пространственного разрешения исследуемых КА ДЗЗ на местности — $R_{\text{РКС}}$ всегда меньше экспериментально измеренных значений их реального линейного пространственного разрешения на местности — $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{э}}$, и определим коэффициент влияния внешних факторов отношением этих величин как $K_{\text{ВВФ}} = R_{\text{ЛРМ}}^{\text{э}}/R_{\text{РКС}}$.

Для обозначения разрешающей способности и пространственного разрешения обычно используют латинские буквы R^* и R соответственно. Строгое определение разрешающей способности применительно к аэрофотосистемам дано в ГОСТе [5]. Как следует из этого определения, разрешающая способность имеет смысл максимальной пространственной частоты, измеряемой обычно в обратных миллиметрах (мм^{-1}), а обратная ей величина — линейное пространственное разрешение — имеет смысл минимального расстояния между отдельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами, измеряемого в единицах длины, например в миллиметрах (мм) в изображении и в метрах (м) на Земле.

В соответствии с определением пространственной частоты значение разрешающей способности можно определить по формуле

$$R^* = f = 1/P_{\text{мин}} = 1/2l_{\text{мин}} \text{ (мм}^{-1}\text{)}, \quad (1)$$

где $l_{\text{мин}}$ — минимальный размер разрешаемого объекта (штриха), характеризующий предельное разрешение в изображении — $R_l = l_{\text{мин}}$, а $P_{\text{мин}} = 2l_{\text{мин}}$ — минимальный разрешаемый период мира, обратный разрешающей способности и характеризующий линейное пространственное разрешение в изображении — R_p :

$$R_p = R = 1/R^* = 2l_{\text{мин}} \text{ (мм)}. \quad (2)$$

Таблица 1. Априорная оценка (прогноз) критерием РКС инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Характеристики КА ДЗЗ			
		Высота съемки H , км	Фокус объектива F , м	Пиксель детектора d , мкм	Прогноз разрешения $R_{РКС} = 2dH/F$, м
1	ALOS	691,65	2,0	7	4,8
2	EROS 1A	480	3,2	13	3,9
3	FormoSat-2	891	2,896	6,5	4,0
4	IRS-1D	817	0,98245	7	11,6
5	БКА	525	1,7975	7,4	4,3
6	«Канопус-В»	510	1,7975	7,4	4,2
7	«Канопус-В»	695	1,7975	7,4	5,7
8	«Ресурс-ДК»	361	4,0	9	1,6
9	«Ресурс-П»	475	4,0	6	1,43

Способности КА ДЗЗ наблюдать близкие мелкие детали ландшафта земной поверхности *раздельно* и воспринимать эти мелкие детали на местности количественно оцениваются:

– во-первых, линейным пространственным разрешением КА ДЗЗ на местности L , связанным с разрешающей способностью в изображении R^* соотношением

$$L = (1/R^*)H/F \text{ (м)}, \quad (3) \text{ и}$$

а с учетом (1), определяемым соотношением

$$L = (2l)H/F \text{ (м)}, \quad (4)$$

и, во-вторых, предельным разрешением на местности — минимальным размером детали объекта на местности A , которая может быть разрешена с помощью данного КА ДЗЗ:

$$A = (1/2R^*)H/F = lH/F \text{ (м)}, \quad (5)$$

где H — высота космической фотосъемки в надир, км, R^* — разрешающая способность КА ДЗЗ, мм^{-1} , определяемая (1), F — фокусное расстояние объектива КА ДЗЗ, м, l — размер минимальной (предельно различимой) детали объекта в изображении, мм, а $2l$ — линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ в изображении.

В цифровых КА ДЗЗ размер минимальной детали в изображении l равен размеру пикселя d и выражения для линейного (4) и предельного (5) инструментальных разрешений на местности аналоговых КА ДЗЗ преобразуются в цифровых КА ДЗЗ соответственно к виду

$$R_{РКС} = 2dH/F \text{ (м)} \quad (6)$$

$$R_{GSD} = dH/F \text{ (м)}. \quad (7)$$

Дав здесь необходимые определения, перейдем к экспериментам СВПН [3], определяющим эти величины.

Экспериментальное подтверждение априорных оценок инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

Эксперименты по оценке разрешающей способности (РС) и линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности (ЛРМ) проводились [3] на Московском и Пятигорском тестовых

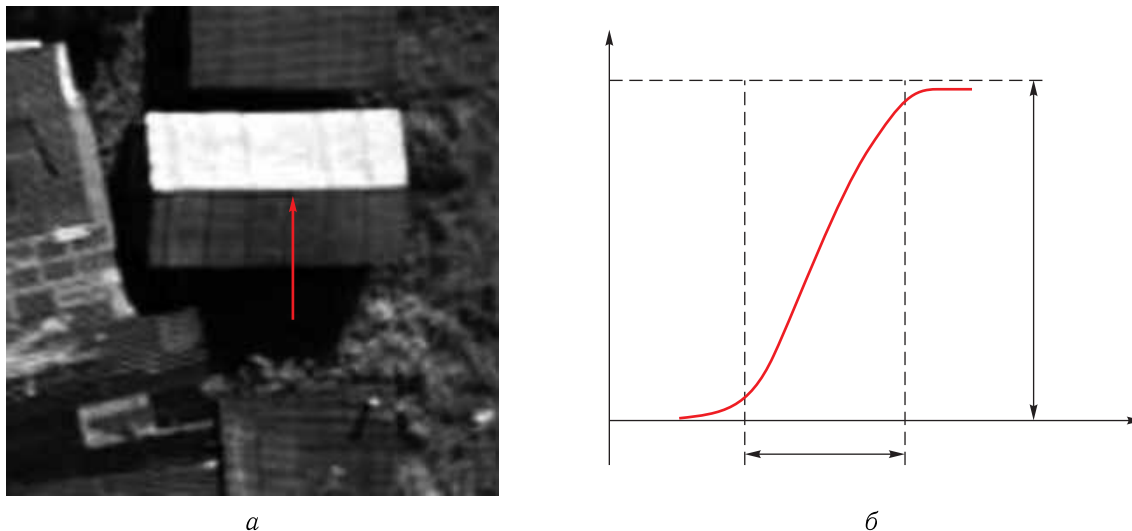


Рис. 1. Иллюстрация пограничного перехода в пределах небольшого фрагмента ЦКС (а) и построенная по данному фрагменту пограничная кривая (б) [3]

участках СВПН. Для оценки этих пространственно-частотных характеристик цифрового космического снимка (ЦКС), полученного КА ДЗЗ, был использован метод, основанный на построении и анализе частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) снимка. В процессе анализа снимка использовались результаты исследования пограничных переходов, изображаемых на нем естественных объектов местности. Очевидно, что это должны были быть контрастные объекты либо природного, либо антропогенного происхождения [6].

Суть пограничного перехода наглядно показана на рис. 1, а. Он имеет вид плавного перехода и описывается пограничной кривой $Y = DN(x)$ (рис. 1, б), характеризующей зависимость измеренных поперек зоны перехода значений яркости пикселей ($DN_{i,j}$) от их смещения (x) поперек границы перехода.

Совокупность пограничных кривых, характеризующих фрагменты ЦКС, является исходной информацией для реализации процесса оценки ЧКХ. Этот процесс включает следующие этапы.

«**Этап 1.** Экспертом выделяется на исследуемом ЦКС ряд характерных зон. Согласно экспериментам, наиболее рациональное их число — пять, например левый верхний угол, левый нижний угол, правый верхний угол, правый нижний угол и середина.

Этап 2. Формируются множества фрагментов для каждой из выделенных зон ЦКС, удовлетворяющих следующим требованиям:

- в любом из выбранных фрагментов должен присутствовать объект с пограничными переходами;
- число выбранных фрагментов для каждой зоны должно быть достаточным (согласно экспериментам — порядка пяти) для создания представительной выборки объектов с пограничными переходами;
- размеры фрагмента должны быть достаточными для создания представительной выборки пикселей, по которой будет построена пограничная кривая.

Этап 3. Для каждого элемента каждого множества фрагментов для всех выделенных зон ЦКС строится профиль пограничного перехода $DN(n)$. В рамках выполнения данной процедуры, показанной на рис. 2, профиль строится по одному столбцу, выбранному ближе к середине фрагмента горизонтально расположенного пограничного перехода. Процедура построения $DN(n)$ при вертикальном расположении пограничного перехода аналогична описанной выше, но для ее построения на фрагменте выбирается строка.

Этап 4. На базе множества профилей $DN(n)$, графическое представление которых показано на рис. 2, определяются их производные по формуле

$$D_{\text{diff}}DN_k = DN_k - DN_{k+1}, \quad (8)$$

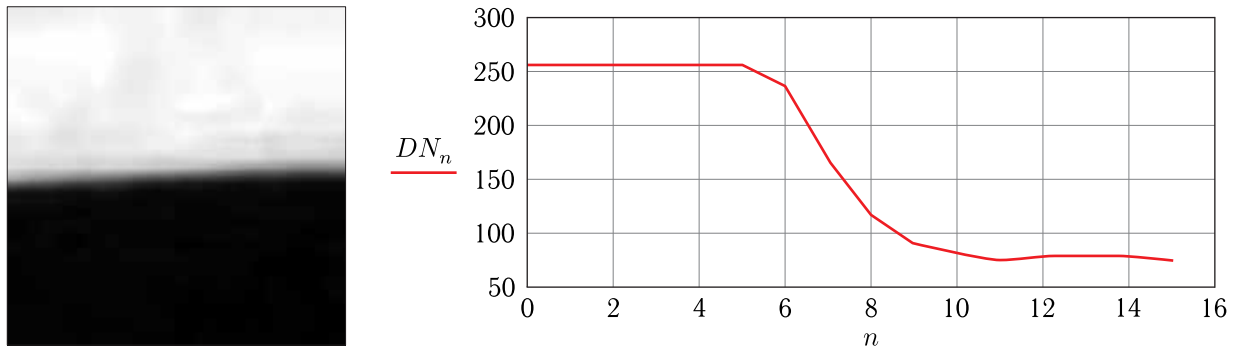


Рис. 2. Иллюстрация процедуры построения профиля пограничного перехода $DN(n)$ [3]

где DN_k — оптическая плотность k -го пикселя, $k \in (0 \dots n - 1)$, n — число пикселей профиля, к ее первому (максимальному) значению:

$$ЧКХ_j = ЧФ_j / ЧФ_1. \quad (9)$$

Вид данной функции ЧКХ [7], являющейся мерой яркостного контраста объектов заданного размера и частоты на ЦКС, показан на рис. 4.

Пересечение здесь функции ЧКХ с пунктирной прямой порогового значения яркостного контраста 0,1, характерного для фотометрических целей, дает максимальную пространственную частоту пиксельных периодов, которую можно воспринять на данном ЦКС, т. е. дает разрешающую способность снимка R^* (мм^{-1})» [3].

Этап 7. Производится оценка реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{ЛРМ}}$ по определенному на этапе 6 значению разрешающей способности снимка R^* (мм^{-1}), согласно [2], как

$$R_{\text{ЛРМ}} = (1/R^*) \times H/F \text{ (м)} \quad (10)$$

и оценка предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности — минимального линейного размера наблюдаемого объекта $R_{\text{ГРМ}}$, определяемого [2], как

$$R_{\text{ГРМ}} = (1/2R^*) \times H/F \text{ (м)}. \quad (11)$$

Здесь F — фокусное расстояние объектива ОЭА КА ДЗЗ, м, а H — средняя высота орбиты КА ДЗЗ, км.

Результаты применения последовательности операций (этапы 1–7) к реальным цифровым космическим снимкам земной поверхности, полученным [3] на Московском и Пятигорском тестовых участках СВПН отечественными и зарубежными КА ДЗЗ, сведены в табл. 2.

Множество вычисленных $D_{\text{diff}}-DN_k$ сохраняют всю информацию о передаточных свойствах снимка и имеют вид, который показан на рис. 3.

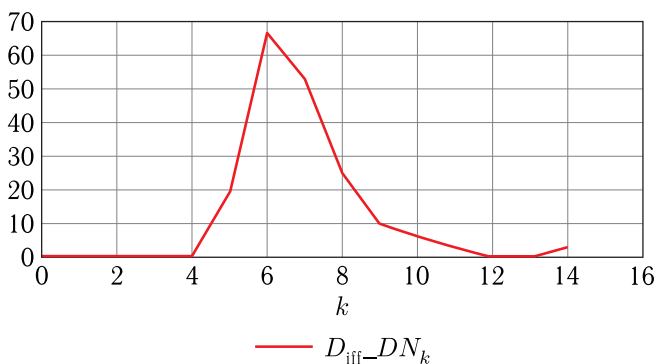


Рис. 3. Иллюстрация графического вида функции $D_{\text{diff}}-DN_k$ [3]

Этап 5. Для определения частотной функции (ЧФ) изображения необходимо обработать функцию производных $D_{\text{diff}}-DN_k$ с использованием одного из алгоритмов преобразования Фурье (ПФ). При анализе ЦКС функция исходной информации о передаточных свойствах ЦКС, представляющая собой пространственное распределение — зависимость яркости изображения от пространственных координат, дискретна. В данном случае при ее преобразовании из пространственной области в частотную необходимо использовать алгоритмы, основанные на дискретном ПФ (ДПФ). Реализация быстрого ПФ (БПФ) приводит к существенному уменьшению вычислительной сложности ДПФ.

Этап 6. Построение ЧКХ путем нормировки полученной в результате БПФ частотной функции

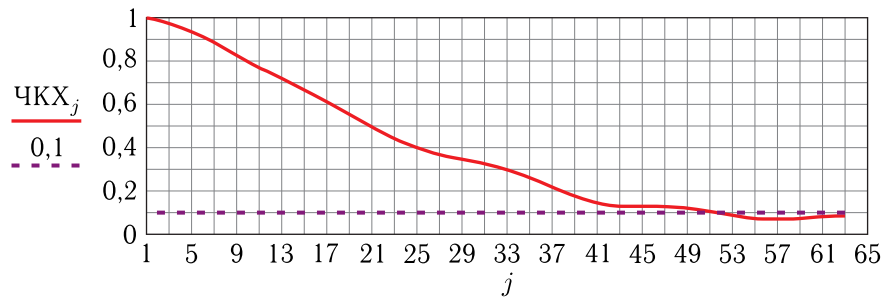


Рис. 4. Иллюстрация функции ЧКХ и ее пересечения с пороговым значением яркостного контраста 0,1 [3]

Таблица 2. Сводная таблица результатов экспериментального определения разрешающей способности снимков и линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

КА ДЗЗ		FormoSat-2	БКА	«Канопус-В»	
Название сенсора		<i>RSI 1 (PAN)</i>	<i>PSS</i>	<i>ПСС</i>	<i>ПСС</i>
Фокусное расстояние объектива ОЭА F , м		2,896	1,7975	1,7975	1,7975
Размер пикселя цифрового детектора ОЭА d , мкм		6,5	7,4	7,4	7,4
Средняя высота орбиты КА ДЗЗ H , км		891	525	510	695
Размеры фрагментов пограничных переходов, pxl		8×8	8×8	8×8	8×8
Объем выборки n , pxl		128	128	128	128
Частота Найквиста цифрового детектора ОЭА $f_N = (1/2d) \cdot 10^3, \text{мм}^{-1}$		76,923	67,568	67,568	67,568
Экспериментально определенная средняя разрешающая способность по зонам снимка $R_3^*, \text{мм}^{-1}$	<i>центр</i>	70	48	55	56
	<i>лев. ниж.</i>	61	47	47	62
	<i>лев. верх.</i>	62	44	54	61
	<i>пр. верх.</i>	74	41	39	53
	<i>пр. ниж.</i>	68	44	49	47
Средняя разрешающая способность снимка $R^*, \text{мм}^{-1}$		67	45	49	56
Минимальный линейный размер объекта — предельное геометрическое разрешение на местности — $R_{ГРМ}$ Линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности — $R_{ЛРМ}$, по зонам снимка $R_{ГРМ} R_{ЛРМ}, \text{М}$	<i>центр</i>	2,192 4,40	3,020 6,08	2,834 5,16	3,443 6,90
	<i>лев. ниж.</i>	2,500 5,04	3,088 6,21	3,013 6,03	3,105 6,24
	<i>лев. верх.</i>	2,452 4,81	3,278 6,64	2,624 5,25	3,158 6,34
	<i>пр. верх.</i>	2,071 4,16	3,493 7,12	3,555 7,28	3,634 7,30
	<i>пр. ниж.</i>	2,261 4,52	3,293 6,64	2,871 5,79	4,089 8,23
Минимальный линейный размер объекта — предельное геометрическое разрешение на местности — $R_{ГРМ} = (1/2R^*) \cdot H/F, \text{м}$		2,30	3,23	2,98	3,49
Реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности, отображаемое на снимке, — $R_{ЛРМ}^3 = (1/R^*) \cdot H/F, \text{м}$		4,59	6,54	5,90	7,00
Априорная оценка (прогноз) инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности — $R_{РКС}$ (табл. 1) $R_{РКС} = (1/f_N) \cdot H/F = 2dH/F, \text{м}$		4,0	4,3	4,2	5,7

Таблица 2. Окончание

КА ДЗЗ		ALOS	EROS-A1	«Ресурс-ДК»	IRS-1D
Название сенсора		<i>PRISM</i>	<i>HRS</i>	<i>ESI</i>	<i>PAN</i>
Фокусное расстояние объектива ОЭА F , м		2,0	3,2	4,0	0,98245
Размер пикселя цифрового детектора ОЭА d , мкм		7	13	9	7
Средняя высота орбиты КА ДЗЗ H , км		691,65	480	361	817
Размеры фрагментов пограничных переходов, pxl		8 × 8	8 × 8	8 × 8	8 × 8
Объем выборки n , pxl		128	128	128	128
Частота Найквиста цифрового детектора ОЭА $f_N = (1/2d) \cdot 10^3, \text{мм}^{-1}$		71,429	38,462	55,556	71,429
Экспериментально определенная средняя разрешающая способность по зонам снимка R_3^* , мм^{-1}	<i>центр</i>	54	34	42	62
	<i>лев. ниж.</i>	54	33	34	51
	<i>лев. верх.</i>	59	33	47	43
	<i>пр. верх.</i>	56	32	54	54
	<i>пр. ниж.</i>	54	32	49	48
Средняя разрешающая способность снимка R^*, мм^{-1}		55	33	45	52
Минимальный линейный размер объекта — предельное геометрическое разрешение на местности — $R_{ГРМ}$ Линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности — $R_{ЛРМ}$, по зонам снимка $R_{ГРМ}$ $R_{ЛРМ}$, м	<i>центр</i>	3,187 6,40	2,159 4,41	1,074 2,14	6,701 13,4
	<i>лев. ниж.</i>	3,187 6,40	2,245 4,55	1,327 2,65	8,099 16,3
	<i>лев. верх.</i>	2,908 5,86	2,237 4,55	0,960 1,92	9,456 19,3
	<i>пр. верх.</i>	3,112 6,18	2,328 4,69	0,836 1,67	7,603 15,4
	<i>пр. ниж.</i>	3,174 6,40	2,303 4,69	0,920 1,84	8,545 17,3
Минимальный линейный размер объекта — предельное геометрическое разрешение на местности — $R_{ГРМ} = (1/2R^*) \cdot H/F$, м		3,11	2,25	1,02	8,08
Реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности, отображаемое на снимке — $R_{ЛРМ}^э = (1/R^*) \cdot H/F$, м		6,3	4,6	2,0	16,3
Априорная оценка (прогноз) инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности — $R_{РКС}$ (табл. 1) $R_{РКС} = (1/f_N) \cdot H/F = 2dH/F$, м		4,8	3,9	1,6	11,6

На основании экспериментальных данных, представленных в табл. 2, видно, что предсказанные критерием РКС значения инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{РКС}$ (табл. 1) всегда меньше полученных экспериментально значений реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}^э$. Это экспериментально подтверждает свойство критерия РКС давать априорную оценку минимального (инструментального)

линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности.

Введем понятие — средний коэффициент влияния внешних факторов $K_{ВВФ}^с$ и определим его как среднее значение отношений экспериментально измеренных величин реального линейного пространственного разрешения $R_{ЛРМ}^э$ (табл. 2) к предсказанным критерием РКС величинам $R_{РКС}$ инструментального линейного пространственного разрешения (табл. 1).

Знание величины среднего коэффициента влияния внешних факторов $K_{\text{ВВФ}}^c$ дает возможность предсказания среднего реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности по предсказанной критерием РКС величине инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности как

$$R_{\text{ЛРМ}}^n = R_{\text{РКС}} \times K_{\text{ВВФ}}^c \text{ (м)}. \quad (12)$$

Определим величину среднего коэффициента влияния внешних факторов $K_{\text{ВВФ}}^c$ и дадим прогноз (12) реального линейного пространственного разрешения исследуемых [3] КА ДЗЗ на местности. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

На основании экспериментов [3] и обработки их результатов, представленных в табл. 3, получено, что средний коэффициент влияния внешних факторов равен $K_{\text{ВВФ}}^c = 1,3$ раз. Это важный результат, так как он позволяет, предсказывать (12) среднее реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности — $R_{\text{ЛРМ}}^n$ по априорной оценке инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности — $R_{\text{РКС}}$ (табл. 1). Пример такого предсказания

к экспериментальным данным [3] дан в четвертом столбце табл. 3. Точность такого предсказания оказалась допустимой, так как ошибка частных предсказаний для рассмотренных КА ДЗЗ не превысила 15%, а средняя относительная ошибка предсказания по всем КА ДЗЗ составила 7,43%.

Подтвердим достоверность полученных выше результатов и правильность сделанных выводов другими экспериментами СВПН [4]. В отличие от рассмотренных экспериментов [3] с естественными тест-объектами эксперименты в [4] проводились путем получения и обработки цифровых космических снимков искусственных тест-объектов, полученных КА ДЗЗ «Ресурс-П» на тестовых участках МИИГАиК. В соответствии с проведенными выше исследованиями прогнозируемая величина инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ «Ресурс-П» на местности составляет $R_{\text{РКС}} = 1,43$ м (табл. 1 и ранее [1]), а прогнозируемая величина среднего реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ «Ресурс-П» на местности при $K_{\text{ВВФ}}^c = 1,3$ раза в соответствии с (12) составляет $R_{\text{ЛРМ}}^n = 1,86$ м. Проверим эти предсказания экспериментами [4].

Таблица 3. Априорная оценка (прогноз) реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Характеристики КА ДЗЗ			
		Коэффициент влияния внешних факторов (КВВФ) частный $K_{\text{ВВФ}}^c = R_{\text{ЛРМ}}^n / R_{\text{РКС}}$, раз	Прогноз реального разрешения (12) $R_{\text{ЛРМ}}^n = R_{\text{РКС}} \times K_{\text{ВВФ}}^c$, м	Абсолютная ошибка прогноза $\Delta = R_{\text{ЛРМ}}^n - R_{\text{ЛРМ}}^z $, м	Относительная ошибка прогноза $\Delta_{\text{отн}} = (\Delta / R_{\text{ЛРМ}}^n) \times 100$, %
1	ALOS	1,3125	6,24	0,06	0,95
2	EROS 1A	1,1795	5,07	0,47	10,2
3	FormoSat-2	1,1475	5,2	0,61	13,3
4	IRS-1D	1,4052	15,08	0,5	3,1
5	БКА	1,5209	5,59	0,95	14,5
6	«Канопус-В»	1,4048	5,46	0,44	7,5
7	«Канопус-В»	1,2281	7,41	0,41	5,9
8	«Ресурс-ДК1»	1,25	2,08	0,08	4,0
		КВВФ средний $K_{\text{ВВФ}}^c = 1,3$ раза			$\Delta_{\text{отн}}^c = 7,43\%$

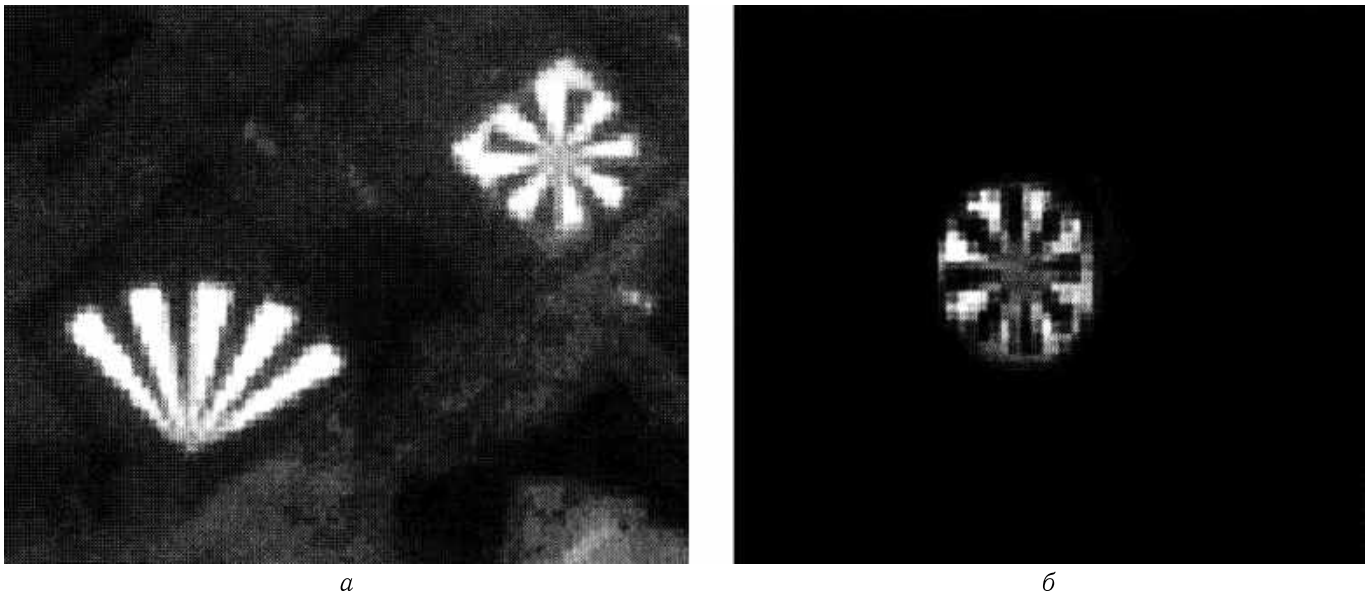


Рис. 5. Изображения мир, полученные КА ДЗЗ «Ресурс-П»: а – СРМ и ССРМ; б – ППРМ

В экспериментах в качестве искусственных тест-объектов были использованы три радиальных мира: стационарная радиальная мира (СРМ), секторная стационарная радиальная мира (ССРМ) и переносная пневматическая радиальная мира (ППРМ), представленные на рис. 5.

«Выбор в качестве тест-объектов “радиальных” мир обусловлен относительной простотой их изготовления, а главное, возможностью определения разрешающей способности (РС) в широком непрерывном диапазоне пространственных частот и по любым направлениям. Для проведения экспериментов СВПН в МИИГАиК была изготовлена мира радиального типа, состоящая из 16 секторов, и предложен метод оценки разрешающей способности КА ДЗЗ по полученному им изображению мира. Метод основан на поиске в изображении мира наименьшей окружности, функция яркости вдоль которой имеет не менее восьми максимумов и минимумов, а локальный контраст вдоль которой превышает заданное пороговое значение (например, 0,1). Определив радиус этой окружности R_0 в мм на изображении и величины соответствующих хорд h [$h = 2R_0 \sin(2\pi/32)$], пересекающих черные и белые сектора, можно оценить разрешающую способность в изображении, как $R^* = 1/L$ (пар линий/мм или мм^{-1}), где $L = 2h$ – пространственное разрешение в изображении (мм)» [4]. При этом

реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности определяется проекцией L на Землю как

$$R_{\text{ЛРМ}}^3 = L \times H/F \text{ {м}}. \quad (13 \equiv 10)$$

Алгоритм, реализующий эту методику определения разрешающей способности в эксперименте [4], подробно описан в работе [8].

Методика измерения разрешающей способности включает и оценку точности определений РС и ЛРМ, которая предусматривает возможность вычисления характеристик точности процесса измерения по одному снимку на основе статистической обработки m значений, полученных для различных l направлений. Для каждой измеряемой величины X (РС или ЛРМ) вычисляют средние значения $X_0 = (1/m) \times \sum_{l=1}^m X_l$ и стандартные отклонения σ :

$$\sigma = \left[\sum_{l=1}^m (X_l - X_0)^2 / (m - 1) \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где m – количество направлений, по которым определены разрешающая способность и ЛРМ, а l – номер направления.

По полученным значениям вычисляют относительную погрешность измерений $\sigma_{\text{отн}} = \sigma/X_0$ » [4].

По изображениям радиальных мир СРМ, ССРМ и ППРМ, представленным на рис. 5, были

Таблица 4. Результаты экспериментальной оценки разрешающей способности (РС) и линейного пространственного разрешения на местности (ЛРМ) КА ДЗЗ «Ресурс-П»

Изображение	Космический аппарат	Контраст	Минимум РС		Максимум РС		Средние значения		Стандартные отклонения		Относительная погрешность	
			РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, раз	ЛРМ, раз
а	«Ресурс-П», мира СРМ	0,1	0,48	2,08	0,56	1,79	0,52	1,92	0,03	0,05	0,06	0,06
	«Ресурс-П», мира ССРМ	0,1	0,43	2,33	0,57	1,75	0,50	2,0	0,06	0,12	0,11	0,12
б	«Ресурс-П», мира ППМ	0,1	0,53	1,89	0,69	1,45	0,61	1,64	0,06	0,08	0,10	0,10

проведены расчеты разрешающей способности (РС) и линейного пространственного разрешения на местности (ЛРМ) КА ДЗЗ «Ресурс-П», результаты которых для значений порогового контраста 0,1 представлены в табл. 4.

На основании экспериментальных данных, представленных в табл. 4, можно сделать следующие выводы:

– во-первых, во всех экспериментах с тремя радиальными мирами получено, что реальные значения линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ «Ресурс-П» на местности $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{э}}$ больше величины инструментального линейного пространственного разрешения $R_{\text{РКС}} = 1,43$ м, априорно предсказанного критерием РКС.

Это подтверждает тот факт, что критерий РКС дает априорную оценку минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{РКС}}$, и можно утверждать, что любые кем-либо полученные экспериментальные данные величины линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, меньшие прогноза $R_{\text{РКС}}$, являются ошибкой;

– во-вторых, получено, что средняя по всем трем экспериментам величина реального линейного пространственного разрешения, определенная как $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{эс}} = (1,92 + 2,0 + 1,64)/3 = 1,85$ м, практически совпадает с предсказанной выше для КА ДЗЗ «Ресурс-П» величиной реального линейного пространственного разрешения на местности $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{п}} = 1,86$ м. Это свидетельствует о правильности предсказания (12), на базе правильно опреде-

ленных величин: априорной оценки $R_{\text{РКС}} = 1,43$ м и среднего коэффициента влияния внешних факторов $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,3$ раза, полученного выше по результатам экспериментальных исследований [3];

– в-третьих, полученная выше величина среднего коэффициента влияния внешних факторов $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,3$ раза подтверждается результатами других экспериментов [4], представленных в табл. 4. Здесь для трех экспериментов с КА ДЗЗ «Ресурс-П» получены частные значения коэффициента влияния внешних факторов $K_{\text{ВВФ}}^{\text{ч}} = R_{\text{ЛРМ}}^{\text{э}}/R_{\text{РКС}}$, равные, соответственно, 1,34, 1,4 и 1,15, а средний коэффициент влияния внешних факторов в этих экспериментах, определенный как $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = (1,34 + 1,4 + 1,15)/3$, получен равным $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,297$ раза и практически совпал с полученной выше по экспериментам [3] величиной $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,3$ раза. Это подтверждает правомерность использования величины $K_{\text{ВВФ}}^{\text{с}} = 1,3$ раза для прогнозирования (12) среднего реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{ЛРМ}}^{\text{п}}$ по прогнозу его инструментального линейного пространственного разрешения $R_{\text{РКС}}$.

Заключение

В результате проведенных исследований и с учетом публикаций, представленных в списке литературы, можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный в [1] российский критерий РКС, определяемый проекцией двух пикселей (периода частоты Найквиста) цифрового детектора

ОЭА на Землю, дает априорную оценку минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности [2].

2. Экспериментами в СВПН [3,4] подтверждено свойство критерия РКС обеспечивать априорную оценку (предсказание) минимального (инструментального) линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности.

3. Введено понятие коэффициента влияния внешних факторов $K_{ВВФ}$ как отношение экспериментально определенной величины линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}^э$ к предсказанному критерием РКС инструментальному линейному пространственному разрешению $R_{РКС}$ ($K_{ВВФ} = R_{ЛРМ}^э / R_{РКС}$) и на основании экспериментальных данных [3] получено среднее значение величины коэффициента влияния внешних факторов, равное $K_{ВВФ}^с = 1,3$ раз.

4. Знание величины среднего коэффициента влияния внешних факторов $K_{ВВФ}^с = 1,3$ раза, полученной по экспериментальным данным [3] и подтвержденной экспериментами [4], является чрезвычайно важным, так как позволяет предсказывать среднее реальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ}^п$ по предсказанному критерию РКС инструментальному линейному пространственному разрешению $R_{РКС}$ как $R_{ЛРМ}^п = R_{РКС} \times K_{ВВФ}^с$.

Список литературы

1. Свиридов К.Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П (№ 1, 2, 3)» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 2. С. 20–28.
2. Тюлин А.Е., Свиридов К.Н. Дистанционное зондирование Земли сверхвысокого линейного разрешения. М.: Знание, 2022. 95 с.
3. Брагина Е.В. Методика создания тестовых участков для оценки качества материалов космической съемки: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.34, ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ. Москва. 2022. 266 с.
4. Журкин И.Г., Сычев Г.Г., Чабан Л.Н., Грузинов В.С. Экспериментальные исследования и перспективы развития системы валидационных подспутниковых наблюдений // Измерительная техника, 2015, № 3. С. 41–45.
5. ГОСТ 23935-79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. Введен 01.01.1981 г. М.: Изд-во стандартов, 1979. 20 с.
6. Волышко Н.А., Грузинов В.С., Грядинов В.А. Об использовании объектов городской инфраструктуры для валидации космических систем дистанционного зондирования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011, № 4. С. 78–81.
7. Анисеева И.А., Брагина Е.В., Попов С.М. Оценка информационных возможностей материалов космических съемок на основе пространственных преобразований для задач тематического дешифрирования // Приложение к журналу «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». Сб. статей по итогам научно-технической конференции, 2014, № 7–1. С. 68–71.
8. Журкин И.Г., Сычев Г.Г., Грузинов В.С. Методика измерения разрешающей способности космических систем дистанционного зондирования с помощью искусственных объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2012, № 3. С.81–84.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.04.2023

Дата принятия рукописи
в печать 26.05.2023