

УДК 621.396

## О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3)

К. Н. Свиридов

д. т. н., профессор

АО «Российские космические системы»

e-mail: [sviridovkn@yandex.ru](mailto:sviridovkn@yandex.ru)

**Аннотация.** Исследуется инструментальное разрешение аппаратуры космического аппарата (КА) ДЗЗ «Ресурс-П», включающей широкоугольный линзовый объектив «Геотон-Л1» и систему приема и преобразования изображения «Сангур-1У». Для заданных параметров аппаратуры с учетом информационного критерия Найквиста оценивается степень согласования по разрешению выбранного детектора и объектива.

Показано, что для заданных характеристик аппаратуры имеет место не полное (по Найквисту) согласование разрешения детектора с разрешением объектива, что препятствует достижению дифракционного разрешения объектива с апертурой  $D = 0,5$  м. Предельное инструментальное разрешение КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) на местности, ограниченное существующим рассогласованием, соответствует эквивалентной апертуре объектива с  $D_s = 0,19$  м и равно  $R_{\lambda H/D_s} = 1,43$  м. Для обеспечения возможности достижения дифракционного разрешения объектива КА «Ресурс-П» (№ 4, 5), равного  $R_{\lambda H/D} = 0,55$  м, необходимо до запуска согласовать по разрешению объектив с детектором, увеличив фокусное расстояние канала формирования изображений в  $M^X = 2,6$  раз с  $F = 4$  м до  $F_C = 10,41$  м или уменьшив пиксель детектора в 2,6 раз с 6 мкм до 2,3 мкм (где  $M^X$  — отношение частоты отсечки объектива к частоте Найквиста детектора). Предложено оценивать реальное инструментальное разрешение КА ДЗЗ на местности проекцией двух (вдоль линии) пикселей детектора на земную поверхность.

**Ключевые слова:** разрешение объектива, разрешение детектора, критерий Найквиста, согласование по разрешению, предельное инструментальное разрешение, турбулентная атмосфера

## Limiting Instrumental Resolution of the Resurs-P Spacecraft (No. 1, 2, 3)

K. N. Sviridov

doctor of engineering science, professor

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: [sviridovkn@yandex.ru](mailto:sviridovkn@yandex.ru)

**Abstract.** The paper studies instrumental resolution of the Earth remote sensing (ERS) spacecraft Resurs-P consisting of the wide-angle lens objective Geoton-L1 and the system for reception and transformation of the image Sangur-1U. For the set parameters of the equipment allowing for the Nyquist information criterion, a degree of resolution matching between the selected detector and lens is evaluated.

It is shown that for the set equipment attributes, the match between the detector resolution and the lens resolution is incomplete (according to Nyquist), which hinders the achievement of diffraction-limited resolution of the lens with the  $D = 0.5$  m aperture. The limited instrumental ground resolution of the Resurs-P spacecraft (No. 1, 2, 3) limited by the existing mismatch corresponds to the equivalent aperture of the lens with  $D_E = 0.19$  m and equals  $R_{\lambda H/D_E} = 1.43$  m. To achieve the diffraction-limited resolution of the lens of the Resurs-P spacecraft (No. 4, 5) equal to  $R_{\lambda H/D} = 0.55$  m, it is necessary to match the resolution of the lens and the detector by increasing the focal distance of the display channel by  $M^X = 2.6$  times from  $F = 4$  m to  $F_C = 10.41$  m. Alternatively, it is possible to decrease the pixel of the detector by 2.6 times from  $6 \mu\text{m}$  to  $2.3 \mu\text{m}$  (where  $M^X$  is the ratio of the lens cutoff to the Nyquist frequency of the detector). The paper suggests evaluating the real instrumental resolution of the ERS spacecraft in the area by means of the projections of two (along the line) pixels of the detector onto the surface.

**Keywords:** lens resolution, detector resolution, Nyquist criterion, matching by resolution, limited instrumental resolution, turbulent atmosphere

## Введение

Сегодня основным отечественным КА ДЗЗ сверх высокого разрешения является КА «Ресурс-П» [1]. В настоящее время на орбите находятся три КА «Ресурс-П», запущенных соответственно: «Ресурс-П» № 1 — 25 июня 2013 г., «Ресурс-П» № 2 — 26 декабря 2014 г. и «Ресурс-П» № 3 — 13 марта 2016 г. Космические аппараты «Ресурс-П» пришли на смену космическому аппарату ДЗЗ сверхвысокого разрешения «Ресурс-ДК1» [2]. Основным положительным отличием, обеспечивающим достижение более высокого разрешения в КА «Ресурс-П» по сравнению с КА «Ресурс-ДК1», явилось уменьшение элемента разрешения (пикселя) детектора в панхроматическом режиме наблюдения с  $d = 9$  мкм в КА «Ресурс-ДК1» до  $d = 6$  мкм в КА «Ресурс-П». Остальные параметры аппаратуры сверхвысокого разрешения КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) остались такими же, как и в КА «Ресурс-ДК1», а именно: диаметр приемной апертуры объектива  $D = 0,5$  м, его фокусное расстояние  $F = 4$  м и спектральный диапазон панхроматического канала  $\Delta\lambda = 0,58\text{--}0,8$  мкм. В КА «Ресурс-П» изображения объекта (зондируемого участка земной поверхности) получают с высоты  $H = 475$  км в широкой полосе захвата  $\Pi = 38$  км. При этом используемая здесь, как и в КА «Ресурс-ДК1», стратегия детектирования ВЗН (временной задержки и накопления) обеспечивает получение длинно-экспозиционных изображений, усредненных при детектировании по атмосферным искажениям.

С начала эксплуатации КА «Ресурс-П» и до настоящего времени в научных публикациях встречаются разные данные относительно сверхвысокого пространственного разрешения КА «Ресурс-П» на местности: 1 м в [3], 0,71 м в [4], 0,85 м в [5] и т. д. Заметим, что для КА «Ресурс-ДК1» также декларировалось пространственное разрешение на местности не хуже 1 м [2] при большем в 1,5 раза размере пикселя ( $d = 9$  мкм). Эти данные обусловлены тем, что в качестве теоретического предела пространственного разрешения КА «Ресурс-П», как и КА «Ресурс-ДК1», считали проекцию пикселя (элемента разрешения детектора) на зондируемую земную поверхность. Этот предел простран-

ственного разрешения на местности определяли как

$$R_{dH/F} = dH/F \text{ (м)}, \quad (1)$$

и для КА «Ресурс-П» (при  $d = 6$  мкм,  $F = 4$  м,  $H = 475$  км) он равен  $R_{dH/F} = 0,71$  м, а для КА «Ресурс-ДК1» (при  $d = 9$  мкм,  $F = 4$  м,  $H = 450$  км) он был равен  $R_{dH/F} = 1,00$  м.

Этот критерий (1) оценки пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ сначала за рубежом, где он был назван GSD (Ground Sampling Distance), а затем и в отечественной практике как основная характеристика оценки качества оптико-электронной аппаратуры КА ДЗЗ. GSD дает оптимистичную, но не достоверную оценку. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что в действительности размер пикселя на местности всегда меньше реальной разрешающей способности данных ДЗЗ. Однако в качестве оценки величины разрешающей способности цифровых оптических изображений ДЗЗ сегодня используют размер пикселя на местности (GSD), то есть имеет место неоправданное смешение понятий разрешающей способности изображения и размера его пикселя. Можно предположить, что такой подход к оценке разрешения используется для преднамеренного завышения декларируемых технических характеристик средств ДЗЗ по сравнению с их реальными показателями для повышения конкурентоспособности продуктов ДЗЗ на потребительском рынке.

Учитывая изложенное, дадим реальную оценку предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ «Ресурс-П» в зависимости от степени согласования по критерию Найквиста (Nyquist) [6] пространственного разрешения объектива с пространственным разрешением детектора. Согласно этому критерию при цифровом детектировании сигналов вводится понятие частоты Найквиста  $f_N = f_{1/d}/2$ , равной половине частоты дискретизации  $f_{1/d} = 1/d$ , и при дискретизации аналогового сигнала полезную информацию несут только частоты  $f$ , которые ниже частоты Найквиста ( $f < f_N$ ).

В мировой научно-технической литературе эта теорема отсчетов (выборки) носит название теоремы Найквиста–Шеннона (в России — теоремы Котельникова), которая гласит, что если аналоговый

сигнал имеет спектр, ограниченный частотой  $f_{\text{макс}}$ , то он может быть однозначно и без потерь восстановлен по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой  $f_{1/d} \geq 2f_{\text{макс}}$ , где  $f_{\text{макс}} = f_N$  — верхняя частота в спектре (временном или пространственном).

Рассмотрим согласование по Найквисту пространственного разрешения объектива и детектора.

### Согласование пространственного разрешения детектора с дифракционным разрешением объектива

Высшая пространственная частота объектива, присутствующая в формируемом дифракционном изображении, определяется соотношением [7]

$$f_{D/\lambda F} = D/(\lambda F) \text{ лин/мм}, \quad (2)$$

и для КА «Ресурс-П» при  $\lambda = 0,58 \text{ мкм}$ ,  $D = 0,5 \text{ м}$  и  $F = 4 \text{ м}$  оказывается равной  $f_{D/\lambda F} = 216 \text{ лин/мм}$ .

В соответствии с критерием Найквиста [6] для передачи данной пространственной частоты  $f_{D/\lambda F} = f_{\text{макс}} = f_N$  детектором, то есть для согласования разрешения детектора с дифракционным разрешением объектива (2), требуемая высшая пространственная частота дискретизации детектора должна быть равна

$$f_{1/dc} = K \cdot f_N \text{ лин/мм}, \quad (3)$$

где  $K \geq 2$  — частота выборки, то есть на дифракционный элемент разрешения объектива (диск Эри) должны приходиться как минимум два (вдоль линии) дискретных элемента разрешения (пикселя) детектора.

Тогда при  $K = 2$  получаем в соответствии с (3) требование к согласованному по Найквисту разрешению выбираемого детектора (рис. 1)

$$f_{1/dc} = 2f_{D/\lambda F} = 432 \text{ лин/мм}. \quad (4)$$

(Здесь и на рис. 2, 3 ОПФ — оптическая передаточная функция.)

В связи с отсутствием сегодня чувствительных электронных детекторов оптического излучения с таким разрешением (4), соответствующим пикселю  $d_C = 2,3 \text{ мкм}$ , сначала необходимо выбрать детектор с некоторой пространственной частотой  $f_{1/d}$  и частотой Найквиста  $f_N = f_{1/d}/2$ , а затем необходимо увеличить фокус объектива от величины  $F$  до некоторой согласующей величины  $F_C$ , чтобы удовлетворить условию согласования (5)

$$f_N = f_{1/d}/2 = D/(\lambda F_C) = f_{D/\lambda F_C} \text{ лин/мм}, \quad (5)$$

где  $f_{D/\lambda F_C} = f_N$  частота отсечки объектива, согласованного с выбранным детектором.

Для детектора КА «Ресурс-П» с элементом пространственного разрешения, равным  $d = 6 \text{ мкм}$ , и пространственной частотой дискретизации  $f_{1/d} = 1/d$ , равной  $f_{1/d} = 166 \text{ лин/мм}$ , в соответствии с (5) имеем (рис. 2)

$$f_{D/\lambda F_C} = f_N = f_{1/d}/2 = 83 \text{ лин/мм}. \quad (6)$$

Оценим требуемое увеличение  $M^X$  канала формирования изображений, обеспечиваемое фотоувеличительной оптикой, вводимой в оптико-механический тракт канала формирования для согласования разрешения детектора  $f_{1/d}$  с разрешением объектива  $f_{D/\lambda F}$  [7]:

$$M^X = F_C/F = f_{D/\lambda F}/f_N \text{ раз}. \quad (7)$$

Тогда, при  $f_{D/\lambda F} = 216 \text{ лин/мм}$ ,  $f_N = 83 \text{ лин/мм}$  и  $F = 4 \text{ м}$ , получаем

$$M^X = 2,6 \text{ раз}, \text{ а } F_C = 10,41 \text{ м}. \quad (8)$$

Таким образом, для обеспечения возможности достижения дифракционного разрешения объектива в КА «Ресурс-П» (№ 4, 5) необходимо увеличить фокусное расстояние канала формирования изображений в  $M^X = 2,6$  раз с  $F = 4 \text{ м}$  до  $F_C = 10,41 \text{ м}$ .

Подобное увеличение может быть легко достигнуто, например, с помощью стандартных микрообъективов [8]. Заметим, что для целей такого согласования в астрономии разработана специальная фотоувеличительная оптика [9], обладающая лучшим пропусканием и более широким полем зрения, чем стандартные микрообъективы.

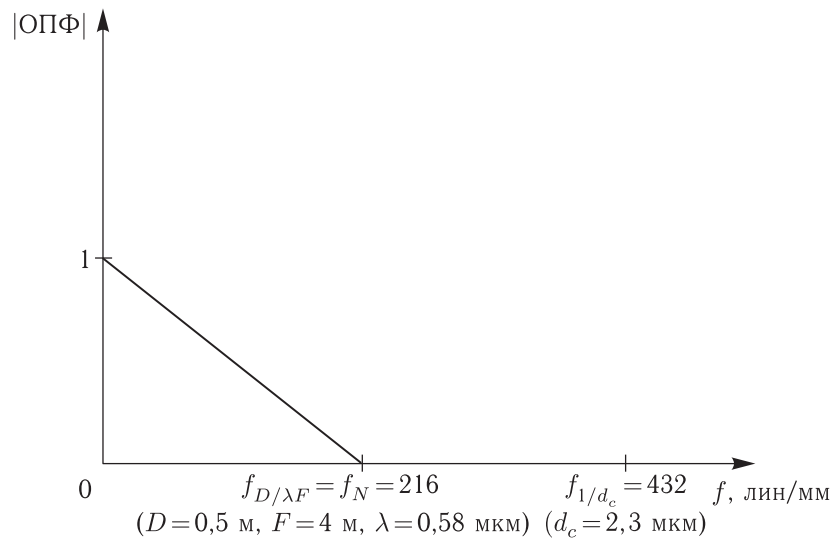


Рис. 1. Выбор детектора согласованием по Найквисту его частоты дискретизации с частотой отсечки объектива

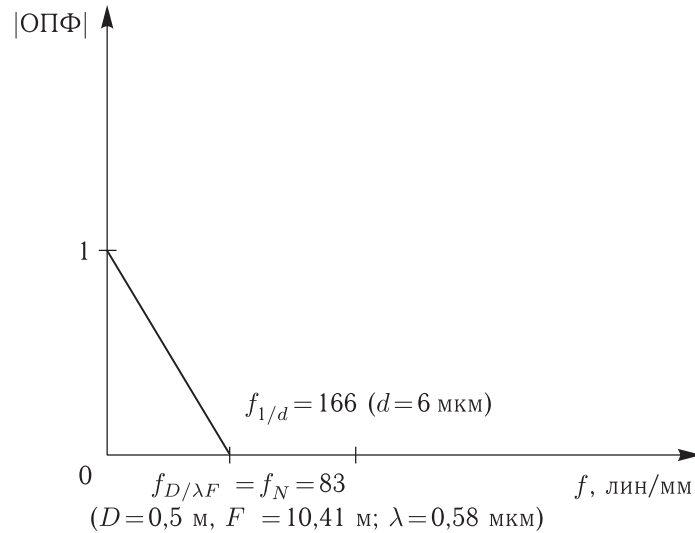


Рис. 2. Согласование по Найквисту частоты отсечки объектива с частотой дискретизации детектора

При обеспечении указанного согласования дифракционное пространственное разрешение КА «Ресурс-П» на местности оценивается соотношением

$$R_{\lambda H/D} = \lambda H/D \text{ м} \quad (9)$$

и при  $\lambda = 0,58 \text{ мкм}$ ,  $H = 475 \text{ км}$ ,  $D = 0,5 \text{ м}$  оказывается равным (в надире)

$$R_{\lambda H/D} = 0,55 \text{ м.} \quad (10)$$

Таким образом, при надлежащем согласовании по разрешению (5) объектива и детектора путем увеличения фокуса до  $F_C = 10,41 \text{ м}$

в КА «Ресурс-П» (№ 4, 5) может быть обеспечена возможность достижения дифракционного пространственного разрешения на местности, равного  $R_{\lambda H/D} = 0,55 \text{ м}$ .

Оценим поле зрения системы объектив–детектор КА «Ресурс-П», получаемое в результате их согласования по разрешению и определяемое как [7]

$$\text{ПЗ}_{F_C} = D_{\text{дет}}/F_C = \text{ПЗ}_F/M^X, \quad (11)$$

где  $D_{\text{дет}}$  — диаметр рабочего поля детектора, а  $\text{ПЗ}_F$  — поле зрения не согласованного по разре-

шению КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3), равное, согласно опубликованным данным [4],  $\text{ПЗ}_F = 5,2$ .

При согласовании по разрешению с  $F_C = 10,41$  м ( $M^X = 2,6$  раз) реальное поле зрения КА «Ресурс-П» будет уменьшено до  $\text{ПЗ}_{F_C} = 2,0$ . При этом ширина полосы захвата КА «Ресурс-П» будет уменьшена с величины  $\text{Ш} = 38$  км до величины  $\text{Ш} = 14,6$  км, соизмеримой с полосой захвата зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения, таких, например, как Pleiades-1A (Франция),  $\text{Ш} = 20$  км; Kompsat-1 (Корея),  $\text{Ш} = 16,8$  км; WorldView-3 (США),  $\text{Ш} = 13,1$  км.

На практике, однако, трудно совместить несовместимое и обеспечить одновременно сверхширокое поле зрения и сверхвысокое разрешение. По-видимому, при наличии не одного, а группировки из пяти и более космических аппаратов ДЗЗ сверхвысокого разрешения отпадет необходимость обеспечения сверхширокого поля зрения каждого КА ДЗЗ в ущерб достижению его сверхвысокого разрешения.

Оценим реальное инструментальное разрешение КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3), ограниченное существующим рассогласованием по разрешению.

### Предельное инструментальное разрешение аппаратуры КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3)

При существующем фокусном расстоянии канала формирования изображений в КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3), равном  $F = 4$  м, и пространственном элементе разрешения (пикселе) детектора, равном  $d = 6$  мкм ( $f_{1/d} = 166$  лин/мм), максимальная пространственная частота объектива, передаваемая детектором (частотой Найквиста), определяется в соответствии с (5) как

$$f_{D_3/\lambda F} = f_N = f_{1/d}/2 \quad (12)$$

и равна  $f_{D_3/\lambda F} = 83$  лин/мм (рис. 3).

Пространственная частота (12) при  $\lambda = 0,58$  мкм и  $F = 4$  м соответствует эквивалентному диаметру апертуры объектива  $D_3$ , определяемому в соответствии с (2) как

$$D_3 = f_{D_3/\lambda F} \cdot \lambda F \quad (13)$$

и равному  $D_3 = 0,19$  м.

Оценим, какое предельное инструментальное разрешение на Земле с высоты  $H = 475$  км может быть достигнуто в КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) с эквивалентным диаметром апертуры объектива  $D_3 = 0,19$  м.

В соответствии с (9) при  $\lambda = 0,58$  мкм имеем

$$R_{\lambda H/D_3} = \lambda H/D_3 = 1,43 \text{ м.} \quad (14)$$

Итак, получили, что предельное инструментальное разрешение на местности, достижимое в КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3), составляет  $R_{\lambda H/D_3} = 1,43$  м.

Легко видеть, что эта величина, полученная с учетом информационного критерия Найквиста, в два раза превышает оценочное разрешение (1)  $R_{dH/F} = 0,71$  м, полученное проекцией одного пикселя детектора на зондируемую земную поверхность (GSD). Это свидетельствует о том, что с учетом критерия Найквиста реальное инструментальное разрешение систем ДЗЗ на местности необходимо оценивать не одним пикселем, а периодом дискретизации, состоящим из двух пикселей (вдоль линии):

$$R_{2dH/F} = 2dH/F. \quad (15)$$

Действительно, оценим этим критерием (проекцией двух пикселей) разрешение на местности для согласуемой по Найквисту аппаратуры КА «Ресурс-П» (№ 4, 5). В соответствии с проведенными выше исследованиями для согласуемой аппаратуры имеем:  $D = 0,5$  м,  $F_C = 10,41$  м,  $H = 475$  км,  $d = 6$  мкм. Для нее разрешение на местности определяется проекцией периода дискретизации как

$$R_{2dH/F_C} = 2dH/F_C \quad (16)$$

и равно  $R_{2dH/F_C} = 0,55$  м.

Полученный результат совпадения оценок пространственного разрешения на местности (9) и (16), а именно  $R_{2dH/F_C} = R_{\lambda H/D} = 0,55$  м,

– во-первых, свидетельствует о необходимости осуществления рассмотренного выше согласования по Найквисту разрешения информационных каналов формирования и детектирования в КА ДЗЗ;

– во-вторых, подтверждает правильность предложенной оценки (15) пространственного разрешения на местности проекцией двух пикселей (периода дискретизации) детектора на зондируемую земную поверхность. Это объясняется тем, что период



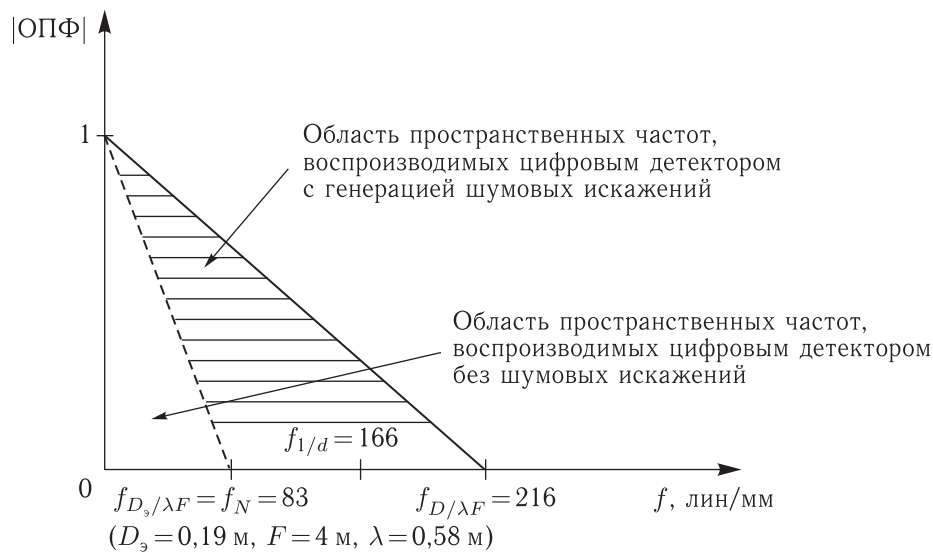


Рис. 3. Шумовые искажения (заштриховано) в спектре детектируемого изображения КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) из-за рассогласования по Найквисту частоты отсечки объектива с частотой дискретизации детектора [6]

дискретизации (два пикселя) детектора при цифровой регистрации изображений ДЗЗ эквивалентен периоду (двум линиям) штриховой миры при определении линейного разрешения на местности для аналоговых изображений ДЗЗ. При этом один пиксель в изображении соответствует половине периода штриховой миры, то есть он эквивалентен одной (темной или светлой) линии и не может характеризовать разрешение в соответствии с ГОСТ. Действительно, определение разрешающей способности применительно к аэрофотосистемам, приведенное в ГОСТ 23935-79, гласит: «Это характеристика оптико-фотографической системы, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуально различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой, при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста». Это значение пространственной частоты, характеризующей разрешающую способность, может быть вычислено по формуле

$$f_{\text{и}} = (2p_{\text{л.мин.}})^{-1}, \quad (17)$$

где  $p_{\text{л.мин.}}$  — минимальная ширина линейно разрешаемого объекта.

Отсюда видно, что разрешающая способность выражает пространственную частоту с периодом, равным удвоенному значению ширины разрешаемых

объектов. Для периодической решетки этот период равен суммарному размеру штриха и промежутка между штрихами. При этом величина минимального линейного разрешения на местности определяется как

$$R_{\text{л.мин.}} = H/Ff_{\text{и}} = 2p_{\text{л.мин.}}H/F. \quad (18)$$

В случае цифрового изображения размер минимального линейно разрешаемого объекта  $p_{\text{л.мин.}}$  равен размеру пикселя  $d$  и формула (18) для линейного разрешения на местности совпадает с формулой (15) для проекции двух пикселей на зондируемую земную поверхность, подтверждая ее справедливость для оценки предельного инструментального разрешения на местности.

## Влияние турбулентной атмосферы на пространственное разрешение КА ДЗЗ

Наличие турбулентной атмосферы Земли между космическим аппаратом ДЗЗ и зондируемым участком земной поверхности ограничивает информационные возможности наблюдательных систем по разрешению [10]. Задачи ДЗЗ, как правило, решаются в ближней зоне (зоне Френеля),

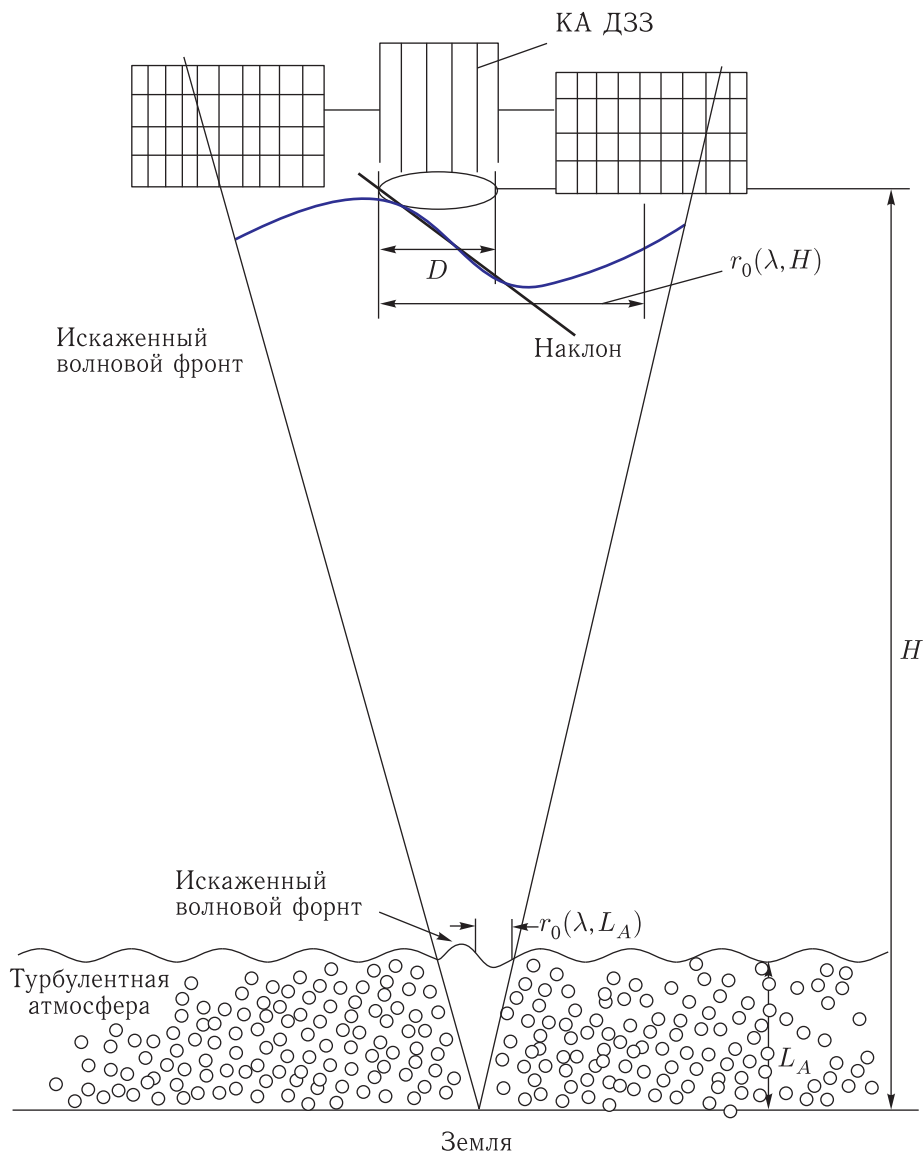


Рис. 4. Геометрия дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

определяемой неравенством

$$D^2 > \lambda H, \quad (19)$$

при этом от каждой точки земной поверхности в направлении КА ДЗЗ распространяется расходящаяся сферическая волна, а искажения волнового фронта, приобретенные ею в пределах турбулентного слоя  $L_A$  (нижние  $L_A = 10$  км атмосферы у земной поверхности), по мере ее распространения до высоты  $H$  КА ДЗЗ пространственно увеличиваются (рис. 4). Величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций светового

излучения на высоте  $H$  КА ДЗЗ определяется соотношением [11]

$$r_0(\lambda, H) \approx H \cdot r_0(\lambda, L_A) / L_A, \quad (20)$$

где  $r_0(\lambda, L_A) \approx 0,1$  м — величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций на верхней границе  $L_A$  турбулентного слоя, а  $\lambda = 0,69$  мкм — средняя длина волны солнечного излучения подсвета в полосе  $\Delta\lambda = (0,58-0,8)$  мкм панхроматического канала КА ДЗЗ «Ресурс-П».

Отсюда легко получить, что на высоте КА «Ресурс-П», равной  $H = 475$  км, величина  $r_0(\lambda, H)$

оказывается равной  $r_0(\lambda, H) = 4,75$  м. Этот результат свидетельствует о том, что величина  $r_0(\lambda, H)$  существенно больше диаметра апертуры объектива КА «Ресурс-П», равного  $D = 0,5$  м. В этих условиях, когда  $r_0(\lambda, H) > D$ , атмосферные искажения волнового фронта на приемной апертуре объектива КА «Ресурс-П» представляют собой случайные наклоны волнового фронта (рис. 4), приводящие к случайным сдвигам мгновенных короткоэкспозиционных изображений при их длинноэкспозиционной регистрации стратегией детектирования ВЗН. Случайные атмосферные сдвиги регистрируемых изображений ухудшают пространственное разрешение системы атмосфера–объектив КА ДЗЗ до величины  $R_{A-O}$ , превышающей рассмотренную выше величину предельного инструментального разрешения (14) в два и более раз в зависимости от состояния турбулентной атмосферы [10].

В настоящее время разработаны аппаратные [12] и алгоритмические [13] технологии, позволяющие корректировать атмосферные искажения. Действительно, пространственное разрешение системы атмосфера–объектив КА ДЗЗ  $R_{A-O}$  можно уменьшить до величины инструментального разрешения  $R_{\lambda H/D}$  или  $R_{\lambda H/D_s}$ , если в процессе длинно-экспозиционной регистрации изображений ДЗЗ адаптивно компенсировать случайные наклоны волнового фронта, приводящие к случайным сдвигам регистрируемого изображения [12]. Можно также уменьшить величину пространственного разрешения системы атмосфера–объектив КА ДЗЗ  $R_{A-O}$  до величины инструментального разрешения  $R_{\lambda H/D_s}$  или  $R_{\lambda H/D}$  адаптивной фильтрацией пространственного спектра зарегистрированного длинно-экспозиционного изображения [13]. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность этих технологий преддетекторной и последдетекторной коррекций атмосферных искажений для уменьшения величины  $R_{A-O}$ . Однако величину  $R_{A-O}$  нельзя сделать меньше величины инструментального разрешения КА ДЗЗ  $R_{\lambda H/D_s}$  (14), что подчеркивает важность рассмотренного выше согласования по разрешению объектива и детектора для обеспечения возможности достижения дифракционного инструментального разрешения  $R_{\lambda H/D}$ .

Таким образом, согласовывая по разрешению с учетом критерия Найквиста (3) объектив и детектор, можно в КА «Ресурс-П» (№ 4, 5) обеспечить возможность достижения дифракционного инструментального разрешения (9), равного  $R_{\lambda H/D} = 0,55$  м.

Заметим, что в согласованной по Найквисту аппаратуре КА ДЗЗ «Ресурс-П» (№ 4, 5) критерий оценки разрешения КА ДЗЗ на местности проекцией одного пикселя детектора на Землю (GSD) (1) при  $d = 6$  мкм,  $H = 475$  км и  $F_C = 10,41$  м равен  $R_{dH/F_C} = 0,27$  м и оказывается в два раза лучше дифракционного предела разрешения, равного  $R_{\lambda H/D} = 0,55$  м, что противоречит физическому смыслу и также подтверждает, что реальное инструментальное разрешение на местности необходимо оценивать проекцией двух (вдоль линии) пикселей на зондируемую земную поверхность.

## Заключение

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

- во-первых, получено, что предельное инструментальное разрешение КА «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) на местности равно  $R_{\lambda H/D_s} = 1,43$  м вместо декларированного ранее [3] однопиксельного разрешения GSD (1), равного  $R_{dH/F} = 0,71$ ;
- во-вторых, для обеспечения возможности достижения дифракционного инструментального разрешения на местности, равного  $R_{\lambda H/D} = 0,55$  м, в КА «Ресурс-П» (№ 4, 5) предложено до их запуска провести доработку аппаратуры в части согласования дифракционного разрешения объектива с пространственным разрешением детектора путем увеличения фокусного расстояния канала формирования изображений ДЗЗ в  $M^X = 2,6$  раз с  $F = 4$  м до  $F_C = 10,41$  м или путем уменьшения элемента разрешения (пикселя) детектора в 2,6 раз с 6 мкм до 2,3 мкм;
- в-третьих, получено, что в согласованной по Найквисту аппаратуре КА ДЗЗ оценка предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности проекцией одного



пикселя детектора на Землю  $R_{dH/Fc}$  оказывается в 2 раза лучше дифракционного предела разрешения  $R_{\lambda H/D}$ , что противоречит физическому смыслу и свидетельствует об ошибочности этой оценки;

- в-четвертых, для оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности предложен критерий, основанный на проекции двух пикселей (периода дискретизации) детектора на зондируемую земную поверхность  $R_{2dH/F}$ ;
- в-пятых, предложено перейти от стратегии детектирования ВЗН, приводящей к получению усредненных длинно-экспозиционных изображений, к стратегии детектирования спектрально-фильтруемых коротко-экспозиционных изображений, так как в реальных условиях ДЗЗ, когда  $r_0(\lambda, H) > D$ , существует высокая вероятность получения не размытого атмосферой, а только сдвинутого ею инструментально ограниченного по разрешению мгновенного изображения;
- и, наконец, в-шестых, предложено в существующих и перспективных системах ДЗЗ обеспечить возможность применения уже разработанных и вновь создаваемых аппаратных и алгоритмических технологий коррекции атмосферных искажений, позволяющих в условиях атмосферного видения достигать инструментального разрешения КА ДЗЗ.

Проведенные здесь исследования и полученные результаты в полной мере относятся и ко всем без исключения зарубежным КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения. Анализ их реального инструментального разрешения и требуемых согласований по Найквисту будет рассмотрен в отдельной статье.

## Список литературы

1. Кирилин А.Н. и др. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика, 2010, № 4. С. 23–26.
2. Петри Г. Российский спутник «Ресурс-ДК1»: альтернативный источник данных сверхвысокого разрешения // Геоматика, 2010, № 4. С. 38–42.
3. «Достоверно из космоса», или «Ресурс-П» № 1 на орбите // Новости космонавтики, 2013, т. 23, № 08. С. 38–42.
4. Ильин А. «Ресурс-П» № 2: не уступая зарубежным аналогам // Новости космонавтики, 2015, т. 25, № 02. С. 38–41.
5. «Швабе» изготовил оптико-электронную аппаратуру для космического спутника «Ресурс-П» № 3 // Пресс-релиз холдинга «Швабе» — ПАО «КМЗ». М., 15 марта 2016.
6. Уэзерелл У. Оценка качества изображения // Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 431 с.
7. Свиридов К.Н. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. М.: Знание, 2005.
8. Schneiderman A., Karo D.P. How to Build a Speckle Interferometer // Opt. Eng., 1977, v. 16. P. 72.
9. Richardson E.H. Optical design of an image degradation reducing enlarging Camera for the prime focus of the CFHT // SPIE, 1983, v. 445. P. 555.
10. Свиридов К.Н. Атмосферная оптика высокого углового разрешения. Т. I–III. М.: Знание, 2007.
11. Свиридов К.Н. О предельном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1. С. 34–40.
12. Свиридов К.Н. Дистанционное зондирование Земли с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 3. С. 12–22.
13. Свиридов К.Н. Адаптивная фильтрация изображений, искаженных турбулентной атмосферой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 40–49.
14. Свиридов К.Н. О новом подходе к получению и обработке изображений ДЗЗ, искаженных турбулентной атмосферой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 4. С. 28–36.
15. Свиридов К.Н. Способ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Патент РФ № 2531024 от 20 августа 2014 г. по заявке на изобретение № 2013125540, заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы».
16. Свиридов К.Н. Алгоритм восстановления коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ, пространственно-неинвариантного к атмосферным искажениям // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 2. С. 31–37.