

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

УДК 528.851 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.3.12.18 EDN ERTPUG

**Расчет параметров каналов передачи информации КА ДЗЗ,
использующих перспективную бортовую аппаратуру**

В. К. Шубин, *contact@spacecorp.ru*

*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

М. М. Виноградова, *contact@spacecorp.ru*

*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

В. М. Траньков, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р. Б. Сятковский, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Построена математическая модель расчета времени нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости наземного пункта приема информации (НППИ). Проведены расчеты объема информации, получаемой КА ДЗЗ с использованием оптико-электронной бортовой аппаратуры для перспективной КС ДЗЗ. Проведено моделирование движения КА ДЗЗ над НППИ и вычислены объемы передаваемой информации в канале КА–Земля в зависимости от времени нахождения КА над НППИ и используемого протокола информационного обмена.

Авторы отмечают, что при продолжительности сеанса связи меньше 370 с и 280 с для канальных скоростей 1200 Мбит/с и 1500 Мбит/с соответственно необходима организация дополнительных сеансов связи с наземными пунктами приема информации с целью обеспечения полной передачи, полученной КА ДЗЗ информации.

Ключевые слова: ДЗЗ, спутники ДЗЗ, бортовая аппаратура ДЗЗ, параметры передачи данных ДЗЗ

**Calculating the Parameters of Earth Remote Sensing Satellite
Data Transmission Channels
Using Advanced Onboard Equipment**

V. K. Shubin, *contact@spacecorp.ru*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

M. M. Vinogradova, *contact@spacecorp.ru*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

V. M. Trankov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

R. B. Syatkovskiy, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents a mathematical model to calculate the time spent by the Earth remote sensing (ERS) spacecraft in the radio visibility zone of a ground-based information receiving station (GBIRS). The paper gives the calculations of the information amount received by the ERS spacecraft using optoelectronic onboard equipment for a promising ERS system. A simulation of the ERS spacecraft movement over the GBIRS was carried out and the volumes of transmitted information in the spacecraft–Earth channel were calculated depending on the time of spacecraft location over and the information exchange protocol used.

The authors note that when the duration of the communication session is less than 370 sec. and 280 sec. for channel speeds of 1200 Mbit/s and 1500 Mbit/s, respectively, it is necessary to organize additional communication sessions with ground receiving stations to ensure the full transfer of the information received by the ERS satellite.

Keywords: Earth remote sensing (ERS), ERS satellites, ERS onboard equipment, ERS data transmission parameters

Введение

В настоящее время общемировой тенденцией является рост информационной составляющей данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что в том числе обусловлено увеличением количества элементов в светочувствительных матрицах линейного и полнокадрового типов в оптико-электронной аппаратуре космических аппаратов (КА) ДЗЗ [1]. Это приводит к возрастанию объемов информации, передаваемой КА ДЗЗ на наземные пункты приема информации (НППИ), и требует оценки пропускной способности каналов передачи данных КА ДЗЗ, использующих перспективную оптико-электронную бортовую аппаратуру (БА), что является целью проведения нижеприведенных расчетов.

Разработчиками систем ДЗЗ рассматриваются следующие способы передачи данных в канале КА–Земля (рис. 1):

- непосредственно со спутников ДЗЗ при пролете над НППИ — прямой сброс. Это самый простой и наиболее распространенный метод передачи данных ДЗЗ;
- использование межспутниковых линий передачи данных между КА ДЗЗ — межспутниковая связь. Данные в этом случае передаются от КА к КА, находящемуся над НППИ;
- использование спутников-ретрансляторов, которые расширяют зону приема сети наземных станций на Земле. Чаще всего спутники-ретрансляторы находятся на геостационарной орбите.

В данной статье представлены расчеты параметров каналов передачи данных КА ДЗЗ, использующих перспективную бортовую аппаратуру, проведенные с помощью разработанной авторами математической модели для способа прямого сброса целевой информации при нахождении КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ.

Анализ

Общей тенденцией развития является стремление к повышению разрешающей способности оптико-электронной аппаратуры спутников ДЗЗ. Например, в 1999 г. первый коммерческий спутник ДЗЗ IKONOS-2 (Space Imaging) имел простран-

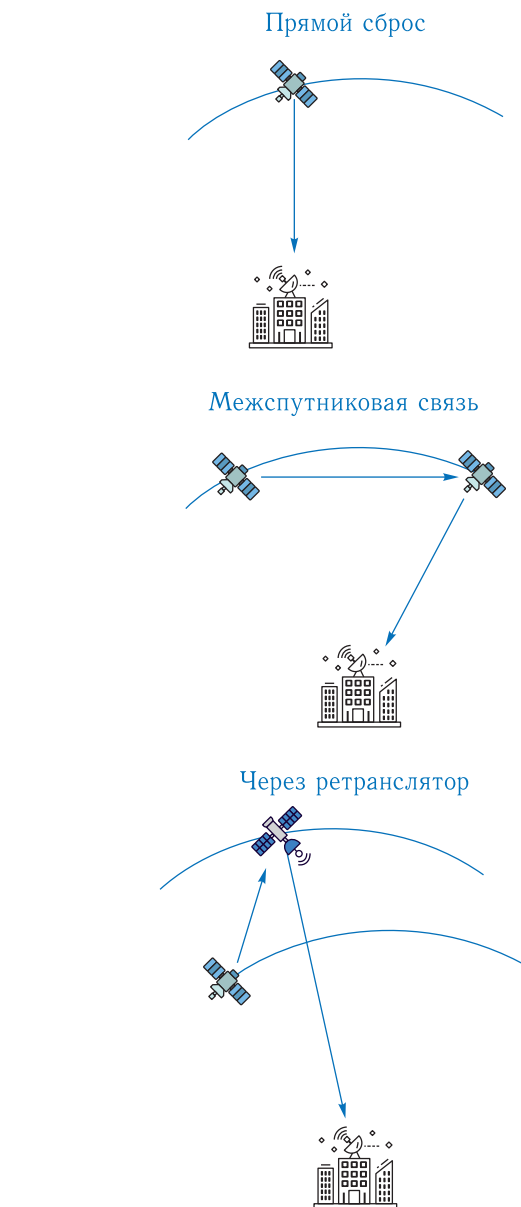


Рис. 1. Способы передачи данных

ственное разрешение 0,81 м, а в 2008 г. спутник GeoEye-1 одноименной компании, которая перешла от Space Imaging, имеет разрешение 0,41 м [2]. В 2001 г. конкурент Space Imaging компания Digital Globe запустила спутник QuickBird-2 с разрешением 0,61 м. В 2007 г. был запущен КА WorldView-1 (разрешение 0,45 м), в 2008 г. — КА WorldView-2 (разрешение 0,45 м) [3], а в 2014 и 2016 гг. на орбиту были выведены спутники WorldView-3 и WorldView-4 (разрешение 0,31 м). Спутники GeoEye-1 и WorldView-1, -2, -3 и -4 были

построены после того, как правительство США выдало лицензии на коммерческие спутники с разрешением до 0,25 м, и их аппаратура может обеспечить такую возможность на низкой орбите. Однако с коммерческой точки зрения требуется не только высокое разрешение, но и большая площадь наблюдения. По этой причине оператор космических систем DigitalGlobe [4] решил использовать на орбите спутники последнего поколения, способные получать изображения с разрешением 31–35 см.

Увеличение пространственного разрешения и полосы захвата, как правило, ведет к существенному возрастанию количества информации, передаваемой на наземные приемные пункты, и соответствует информационной производительности оптико-электронной аппаратуры.

Поэтому необходимо учитывать объем бортового запоминающего устройства и скорость сброса данных на Землю по радиоканалу. Объем бортовой памяти оптико-электронных спутников, используемый для хранения изображений высокого и сверхвысокого разрешения, постоянно увеличивается: спутники первого поколения, такие как IKONOS-2 и QuickBird-2, имели относительно небольшую ем-

кость бортовой памяти — 64 Гбайт и 128 Гбайт соответственно. В этих случаях передача данных на приемную станцию происходила по радиоканалу с пропускной способностью 320 Мбит/с. За один виток можно было отснять от 64 до 100 сцен до заполнения памяти. Объем бортовой памяти космических аппаратов нового поколения увеличился более чем на порядок: 1000 Гбайт для GeoEye-1, 2199 Гбайт для WorldView-1, -2 и -3 и 3200 Гбайт для WorldView-4. Скорость передачи данных с борта на Землю увеличилась до 740 Мбит/с (GeoEye-1), 800 Мбит/с (WorldView-1, -2 и -4) и 1200 Мб/с (WorldView-3). Радиолиния передачи данных из космоса на Землю в X-диапазоне практически достигла максимальной скорости, а в системах следующего поколения рассматривается возможность использования других частотных диапазонов для передачи данных, в том числе и оптического.

Анализ характеристик современных низкоорбитальных КА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешений (табл. 1) показывает прямую зависимость скорости передачи информации от разрешения съемки — чем выше разрешение съемки, тем выше скорость передачи данных (рис. 2).

Таблица 1. Характеристики низкоорбитальных КА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешений

КА ДЗЗ	Страна	Разрешение (ПХ), м	Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Скорость передачи, Мбит/с
IKONOS-2	США	0,81	11	700	320
QuickBird-2	США	0,61	16,5	450	320
«Ресурс-ДК1»	Россия	0,8	28,4	350-600	300
KOMPSat-2	Корея	1	15	685	320
EROS-B	Израиль	0,7	7,1	500	280
WorldView-1	США	0,45	16,0	496	800
GeoEye-1	США	0,41	15,2	681	740
WorldView-2	США	0,45	16,4	767	800
Pleiades-1A	Франция	0,7	20	694	465
Pleiades-1B	Франция	0,7	20	694	465
KOMPSat-3	Корея	0,7	16,8	685	600
«Ресурс-П» № 1	Россия	0,7	38,6	475	300
DubaiSat-2	ОАЭ	1,0	12,2	600	160
SkySat-1	США	0,9	8	600	480

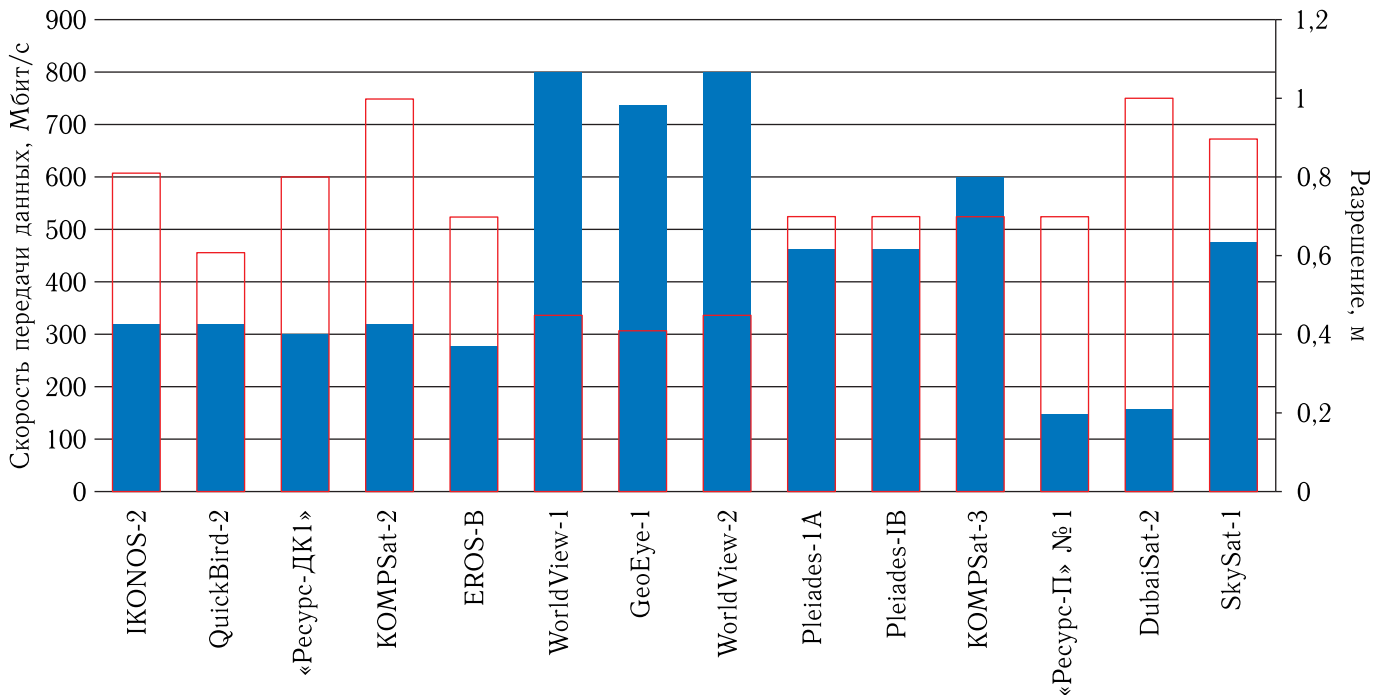


Рис. 2. Характеристики низкоорбитальных КА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешений

Моделирование

Для расчета параметров каналов передачи данных КА ДЗЗ, использующих перспективную оптико-электронную бортовую аппаратуру, разработана математическая модель движения КА ДЗЗ на солнечно-синхронной орбите с учетом его нахождения в зоне радиовидимости наземного пункта приема информации (рис. 3). В качестве исходных данных

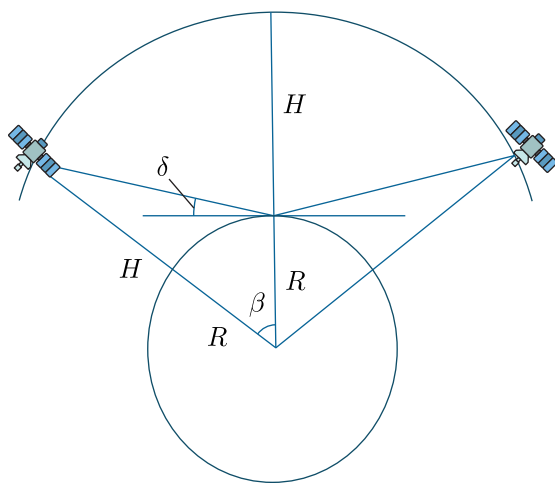


Рис. 3. Зона радиовидимости КА ДЗЗ

для моделирования используется предварительное значение высоты орбиты ($H = 567$ км) перспективной космической системы (КС) ДЗЗ и параметры КМОП-матрицы GMAX4651 фирмы Gpixel и координаты НППИ (г. Москва).

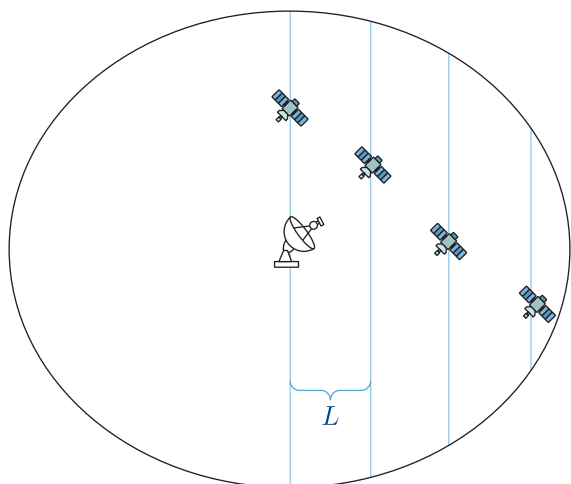
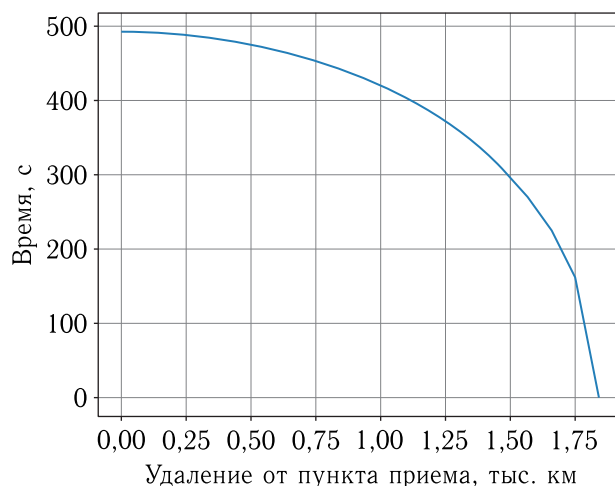
Константы:

- $H = 567$ км — высота орбиты;
- $\delta = 5$ град — угол места, определяющий минимальную высоту спутника над горизонтом, при которой возможен надежный прием радиосигналов;
- $R = 6371$ км — радиус Земли.

Для расчета времени нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ при различных значениях L — удалениях КА ДЗЗ от НППИ (рис. 4) — было проведено моделирование, результаты которого представлены на рис. 5.

Математическое моделирование движения КА ДЗЗ относительно НППИ показало, что максимальное расстояние между ними составляет 1,84 тыс. км, при этом спутник находится в зоне видимости 1 с. При прохождении КА ДЗЗ непосредственно над пунктом приема информации время его видимости составляет 492,5 с.

Существующие в настоящее время системы передачи информации со спутников ДЗЗ используют

Рис. 4. Удаление КА ДЗЗ от НППИ (L , км)Рис. 5. Время нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ в зависимости от его удаления L от НППИ

ряд частотных диапазонов, таких как L, S, C, X и K. Наибольшей выделенной полосой частот обладают X- и K-диапазоны, при этом диапазону X соответствуют частоты от 8 ГГц до 12 ГГц, из которых от 8025 МГц до 8400 МГц (ширина полосы канала $B = 375$ МГц) выделены для построения высокоскоростных спутниковых систем связи [2].

Для расчетов объемов передаваемой информации в канале КА–Земля при нахождении КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ использовались параметры передачи данных бортовой аппаратуры, представленные в табл. 2.

Расчет объемов получаемой информации с использованием оптико-электронной бортовой аппара-

туры для перспективной КС ДЗЗ за один виток проводился на примере КМОП-матрицы GMAX4651 фирмы Grixel [5] для частоты съемки 12 кадр/с и представлен в табл. 3.

Результаты моделирования передачи информации с перспективных КА ДЗЗ на наземные пункты приема информации для канальной скорости 1200 Мбит/с в зависимости от времени нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ отражены на рис. 6.

Для передачи всей полученной КА ДЗЗ информации за один пролет над наземным пунктом приема информации для канальной скорости передачи данных 1200 Мбит/с время сеанса связи

Таблица 2. Параметры скорости передачи информации БА передачи данных

Канальная скорость передачи данных 1200 Мбит/с								
Модуляция*	32АФМ 4/5	32АФМ 5/6	32АФМ 8/9	32АФМ 9/10	64АФМ 4/5	64АФМ 5/6	64АФМ 8/9	64АФМ 9/10
Скорость передачи информации, Мбит/с	960,0	1000,0	1066,7	1080,0	960,0	1000,0	1066,7	1080,0
Канальная скорость передачи данных 1500 Мбит/с								
Модуляция*	64АФМ 5/6		64АФМ 8/9		64АФМ 9/10			
Скорость передачи информации, Мбит/с	1250,0		1333,3		1350,0			

*Предполагаемые в соответствии с рекомендациями CCSDS.

Таблица 3. Объемы информации перспективных КА ДЗЗ для КМОП-матрицы GMAX4651

Ширина матрицы, пикс	8424	
Длина матрицы, пикс	6032	
Частота съемки, кадр/с	12	
Время съемки, с	63,2	
Разрядность сигнала, бит	10	12
Объем кадра, Мбайт	60,57	72,69
Объем снимка, Гбайт	44,86	53,84

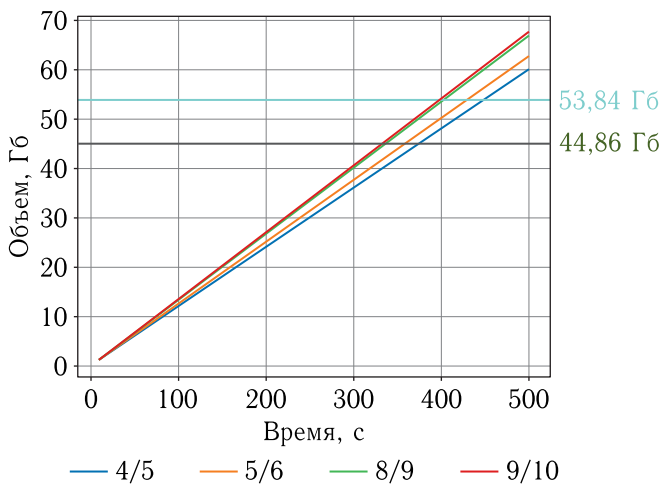


Рис. 6. Объем передаваемой информации для канальной скорости передачи данных 1200 Мбит/с в зависимости от времени нахождения КА ДЗЗ над НППИ

должно быть не менее 370 с, что возможно при прохождении КА ДЗЗ непосредственно над НППИ и на удалениях до 1,25 тыс. км.

Результаты моделирования передачи информации с перспективных КА ДЗЗ на наземные пункты приема информации для канальной скорости 1500 Мбит/с в зависимости от времени нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НППИ отражены на рис. 7.

Для передачи всей полученной КА ДЗЗ информации за один пролет над наземным пунктом приема информации для канальной скорости передачи данных 1500 Мбит/с время сеанса связи должно

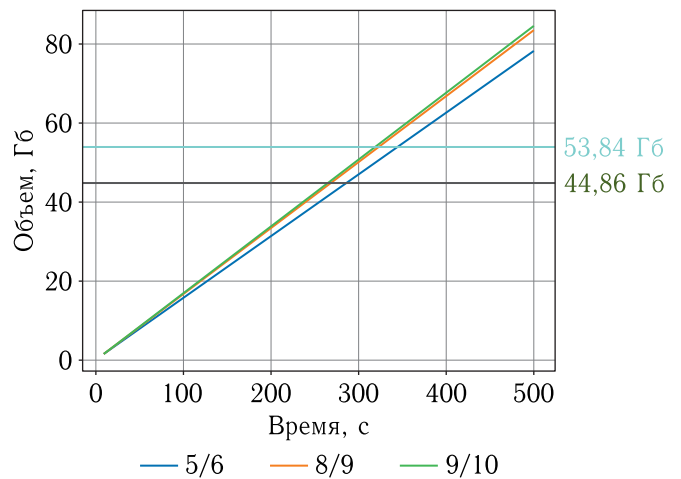


Рис. 7. Объем передаваемой информации для канальной скорости передачи данных 1500 Мбит/с в зависимости от времени нахождения КА ДЗЗ над НППИ

быть не менее 280 с, что возможно при прохождении КА ДЗЗ непосредственно над НППИ и на удалениях до 1,55 тыс. км.

Заключение

Проведенное математическое моделирование способа прямого сброса целевой информации при пролете над наземными пунктами приема информации для перспективных КА ДЗЗ показало принципиальную возможность передачи объема информации, получаемого с помощью рассматриваемой перспективной оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ за один сеанс связи с НППИ. При этом обнаружены следующие ограничения:

- при продолжительности сеанса связи меньше 370 с и 280 с для канальных скоростей 1200 Мбит/с и 1500 Мбит/с соответственно необходима организация дополнительных сеансов связи с наземными пунктами приема информации для обеспечения полной передачи, полученной КА ДЗЗ информации;

- при использовании в оптико-электронной аппаратуре КА ДЗЗ более одной КМОП-матрицы типа GMAX 4651 весь объем полученной информациикратно возрастет и не сможет быть передан за один сеанс связи с НППИ.

Таким образом, использование перспективными КА ДЗЗ способа прямого сброса информации

при увеличении объемов данных может привести к невозможности передачи всего объема полученной информации за один сеанс связи с НППИ, вследствие чего может снизиться оперативность доведения полученной информации конечному потребителю.

Для обеспечения передачи информации на наземный пункт приема за один сеанс связи необходимо использовать более высокоскоростную бортовую аппаратуру, а также рассмотреть другие способы передачи данных с КА ДЗЗ на НППИ.

В дальнейшем планируется продолжение исследований в следующих направлениях:

- моделирование передачи данных со спутников ДЗЗ на НППИ с использованием спутников-ретрансляторов;

- моделирование передачи данных со спутников ДЗЗ на НППИ с использованием межспутниковых линий передачи данных;

- рассмотрение многолучевого и других способов передачи данных со спутников ДЗЗ на наземные пункты приема информации.

Список литературы

1. *Ерешко М. В., Борисов А. В.* Концептуальные сценарии развития наземной космической инфраструктуры приема целевой информации перспективной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // *Космическая техника и технологии*, 2021, № 2(33).
2. *Brender M.* GeoEye-1 The Next-Generation Imagery // *GIS DEVELOPMENT*, 2007, vol. 11, issue 7. P. 58–59.
3. *Херринг Ч.* Спутник WorldView-2 — Новая веха в развитии технологий дистанционного зондирования Земли // *Геоматика*, 2010, № 2. С. 28–32.
4. Коммерческий оператор спутников ДЗЗ DigitalGlobe. <https://digitalglobe.com> (Дата обращения 06.06.2023.)
5. КМОП-матрицы GMAX4651 фирмы Gpixel. <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gmax/gmax4651-4-6-μm-51mp-global-shutter-image-sensor/> (Дата обращения 06.06.2023.)

Дата поступления рукописи
в редакцию 04.05.2023

Дата принятия рукописи
в печать 02.08.2023