

## Фокусировка радиолокационных данных системы COSMO-SkyMed и формирование продукта уровня 1A с представлением в HDF5

### Focusing COSMO-SkyMed radar data and level 1A product formation with representation in HDF5

**Адамовский / Adamovskiy E.**

Егор Русланович

(adamovskiy.y@pdu.by)

магистр технических наук.

Полоцкий государственный университет (ПГУ),  
аспирант кафедры вычислительных систем и сетей.  
г. Новополоцк, Республика Беларусь

**Богущ / Bogush R.**

Рихард Петрович

(bogushr@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ПГУ, заведующий кафедрой вычислительных  
систем и сетей.  
г. Новополоцк, Республика Беларусь

**Наумович / Naumovich N.**

Николай Михайлович

(naumovich@bsuir.by)

кандидат технических наук.

Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
начальник научно-конструкторского центра  
перспективных радиоэлектронных систем  
сантиметрового и миллиметрового диапазонов  
длин волн.

г. Минск, Республика Беларусь

**Ключевые слова:** электронная дистанционное зондирование Земли – Earth observing system; радиолокационное изображение – radar image; формат данных – data format.

Разработаны алгоритм и модель синтеза радиолокационного изображения и представления продукта уровня 1A в стандартизированном формате HDF5 на основе необработанных данных спутниковой системы COSMO-SkyMed. Модель включает предварительную обработку исходных данных, фокусировку по дальности и по азимуту, перенос, расчет и запись атрибутов, представление радиолокационных данных в формат HDF5. Корректность результирующих данных и возможность их обработки показана с помощью специализированного программного обеспечения NEST 5.1.

An algorithm and model for synthesizing a radar image and level 1A product representation in standardized HDF5 based on raw data from the COSMO-SkyMed satellite system have been developed. The model includes initial data preprocessing; range and azimuth focusing; attributes transmission, calculation and recording; radar data presentation in HDF5. The correctness of the data obtained, and the possibility of their processing is shown using the specialized software NEST 5.1.

### Введение

Расширение области использования дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) в различных отраслях промышленности и для военного применения обеспечивает актуальность разработки методов обработки радиолокационных данных, формируемых такими системами.

Современные системы ДЗЗ используют для получения радиолокационных изображений (РЛИ) метод радиолокационного синтеза апертуры (РСА), который не зависит от метеоусловий и освещенности, а также обеспечивает высокое пространственное разрешение данных [1]. На основе сигналов, получаемых с помощью антенны на борту ИСЗ, формируется продукт нулевого уровня, содержащий радиоголограмму (РГГ) и дополнительную информацию – метаданные, которые представляют собой набор атрибутов, описывающих параметры съемки и аппаратуры, необходимые для идентификации и дальнейшей обработки РЛИ.

Различные системы ДЗЗ используют собственные форматы представления радиолокационных данных, а также стандарты, определяющие набор уровней продуктов и содержащихся в них данных. Как правило, выделяют следующие уровни, обозначаемые цифрой,

включающие подуровни, именуемые буквами латинского алфавита:

- Уровень 0: необработанные «сырые» данные.
- Уровень 1–2: продукт содержит сфокусированное РЛИ с геодезической привязкой, радиометрической и геометрической коррекцией. На уровне 1А РЛИ является двухканальным массивом, содержащими амплитуду и фазу отраженного сигнала. При формировании уровня 1В и выше каналы объединяются и подвергаются коррекции.
- Уровень 2–3 и выше: тематически обработанные данные уровня 1.

В работе [2] обоснован выбор формата HDF5 как перспективного способа хранения и представления радиолокационных данных систем ДЗЗ. Современным специализированным программным обеспечением (ПО) файлы с расширением «.h5» ассоциируются с продуктами действующей системы ДЗЗ COSMO-SkyMed (Итальянское Космическое Агентство, ASI) [3], представленной орбитальным комплексом из 4

спутников, производящих съемку методом РСА в трех различных режимах с пространственным разрешением до 1 м.

В свободном доступе могут быть обнаружены некоторые файлы и документация, предоставленные разработчиками COSMO-SkyMed:

- спецификация, включающая описание продуктов нулевого уровня и уровня 1А [4];
- продукт нулевого уровня [3];
- примеры продуктов уровня 1А [3].

Алгоритм представления предварительно сфокусированных радиолокационных данных и метаданных в формат HDF5 рассмотрен в работе [5], однако он может быть использован только для первого уровня представления радиолокационной информации системами ДЗЗ.

Целью данной работы является разработка алгоритма и модели для формирования продукта уровня 1А с записью в HDF5 с использованием необработанных данных системы COSMO-SkyMed.

Таблица 1

Структура имени продукта системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

| Параметр имени                | Пример значения       | Описание параметра                      | Значение параметра                          |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| <i>CSK</i>                    | <i>CSK</i>            | Идентификатор продукта                  | Продукт <i>COSMO-SkyMed</i>                 |
| <i>S&lt;i&gt;</i>             | <i>S2</i>             | Номер спутника                          | Спутник №2                                  |
| <i>&lt;YYY_Z&gt;</i>          | <i>RAW_B</i>          | Тип продукта                            | Продукт нулевого уровня                     |
| <i>&lt;MM&gt;</i>             | <i>HI</i>             | Режим съемки                            | Режим « <i>Himage</i> » ( <i>Stripmap</i> ) |
| <i>&lt;SS&gt;</i>             | <i>10</i>             | Номер полосы                            | Полоса №10                                  |
| <i>&lt;PP&gt;</i>             | <i>HH</i>             | Тип поляризации                         | Горизонтальная поляризация                  |
| <i>&lt;s&gt;</i>              | <i>R</i>              | Направление обзора                      | Правое направление обзора                   |
| <i>&lt;o&gt;</i>              | <i>D</i>              | Направление орбиты                      | Нисходящая орбита                           |
| <i>&lt;D&gt;</i>              | <i>S</i>              | Режим доставки данных                   | Стандартный режим доставки                  |
| <i>&lt;G&gt;</i>              | <i>F</i>              | Режим выборочной доступности <i>GPS</i> | Выключено                                   |
| <i>&lt;YYYYMMDD hhmss&gt;</i> | <i>20140105040332</i> | Время начала съемки                     | 04:03:32 5 января 2014 г.                   |
| <i>&lt;YYYYMMDD hhmss&gt;</i> | <i>20140105040340</i> | Время окончания съемки                  | 04:03:40 5 января 2014 г.                   |

В первой части статьи рассмотрены входные и выходные данные модели: их структура, состав и особенности представления. Во второй части описана модель формирования продукта: алгоритм фокусировки РГГ, сопоставление метаданных входного и выходного продуктов, их преобразование, структура целевого файла. В третьей части описана программная реализация модели, а в четвертой части проверена ее корректность путем обработки полученных данных с помощью специализированного ПО.

### Продукт COSMO-SkyMed

В качестве входных данных выступает продукт нулевого уровня системы ДЗЗ COSMO-SkyMed, который представлен архивом, содержащим определенный набор файлов (рис. 1), включая файлы формата HDF5, предоставляющие РГГ и метаданные.

Иерархия файла продукта состоит из базовых компонентов формата HDF5: каталогов, наборов данных (datasets) и атрибутов. Наборы данных могут хранить большие массивы информации, а атрибуты ставят в соответствие ключу определенное значение. Поддерживаются следующие типы данных: целые числа (8, 16 бит), с плавающей точкой (32, 64 бит), строки [6].

Название файла продукта соответствует шаблону, определенному спецификацией COSMO-SkyMed и отражает основные параметры продукта, которые указаны в табл. 1.

Структура продукта нулевого уровня «RAW» системы ДЗЗ COSMO-SkyMed показана на рис. 2. Корневой каталог содержит 128 атрибутов, относящихся ко всему продукту в целом. Каталог S01 предоставляет наборы данных и атрибуты:

- B001: массив РГГ и связанные с ней параметры;
- QLK: изображение в небольшом разрешении для быстрого просмотра, соответствующее сфокусированным данным РГГ;
- REPLICAS: набор отсчетов, представляющих собой опорный ЛЧМ-сигнал, применяемый для фокусировки РЛИ;
- CAL: калибровочные импульсы;
- NOISE: данные о шуме, получаемые из РГГ.

Также в S01 содержатся каталоги START и STOP, каждый из которых содержит собственные наборы CAL и NOISE, полученные при инициализации и окончании сбора данных.

РГГ представлена в виде трехмерного массива целых 8-битных чисел размером 22528X25088X2, который состоит из двух слоев данных: вещественной и мнимой частей полученного сигнала. Опорный импульс является комплексным массивом длиной 4500 отсчетов.

Продукт уровня 1А системы ДЗЗ COSMO-SkyMed имеет наименование «Single-Look Complex Slant» (SCS) и содержит сфокусированное комплексное РЛИ в наклонной азимутальной проекции и перечень атрибутов, определенных спецификацией COSMO-SkyMed,

в формате HDF5. Структура продукта уровня 1А показана на рис. 3.

Согласно рис. 3, из данных нулевого уровня в продукт SCS переносятся сфокусированное РЛИ (набор данных «Single Beam Image» (SBI)) и его уменьшенная копия QLK для быстрого просмотра.

Большая часть атрибутов обоих продуктов идентична по названию, формату, типу данных и адресу хранения, при этом продукт SCS содержит 43 атрибута, отсутствующих в исходных данных нулевого уровня и вычисляемых при формировании данных уровня 1А.

### Методика преобразования радиолокационных данных

Методика формирования продукта уровня 1А состоит из двух этапов: на первом из данных нулевого уровня считывается РГГ (адрес набора данных /S01/B001), которая фокусируется и записывается в промежуточные бинарные файлы (real.dat и imag.dat); на втором этапе создается целевой файл в формате HDF5 (наименование файла формируется согласно табл. 1), в который осуществляется запись сфокусированного РЛИ (адрес набора данных /S01/SBI), переносятся совпадающие атрибуты (адреса /, /S01 и /S01/B001) из продукта нулевого уровня и на их основе вычисляются недостающие данные.

Для продуктов системы COSMO-SkyMed атрибут Acquisition Mode (адрес /) позволяет определить режим съемки. Используемый в качестве примера входных данных продукт нулевого уровня предоставляет значение данного атрибута – «HIMAGE», что эквивалентно режиму StripMap, широко используемому системами ДЗЗ для съемки поверхности Земли.

Для фокусировки полученных в режиме StripMap данных используется алгоритм Range-Doppler (RDA) [7], который получил распространение благодаря простоте реализации, и включает в себя два этапа, на каждом из которых применяется метод согласованного фильтра, построенного на основе характеристик PCA и траектории движения спутника: сжатие по дальности и азимуту в частотной области.

В работе [8] произведен сравнительный анализ алгоритмов фокусировки (RDA, CSA, ECS) и сделан вывод о целесообразности применения RDA при небольших углах отклонения от строго бокового обзора, что обеспечивается современными PCA, в противном случае эффективен алгоритм RDA со вторичным сжатием по дальности.

### Фокусировка RDA

Для реализации сжатия исходной РГГ необходимо выполнить чтение всех необходимых для фокусировки данных: атрибутов продукта, опорного ЛЧМ-сигнала и сам массив РГГ. Сжатие по дальности осуществляется

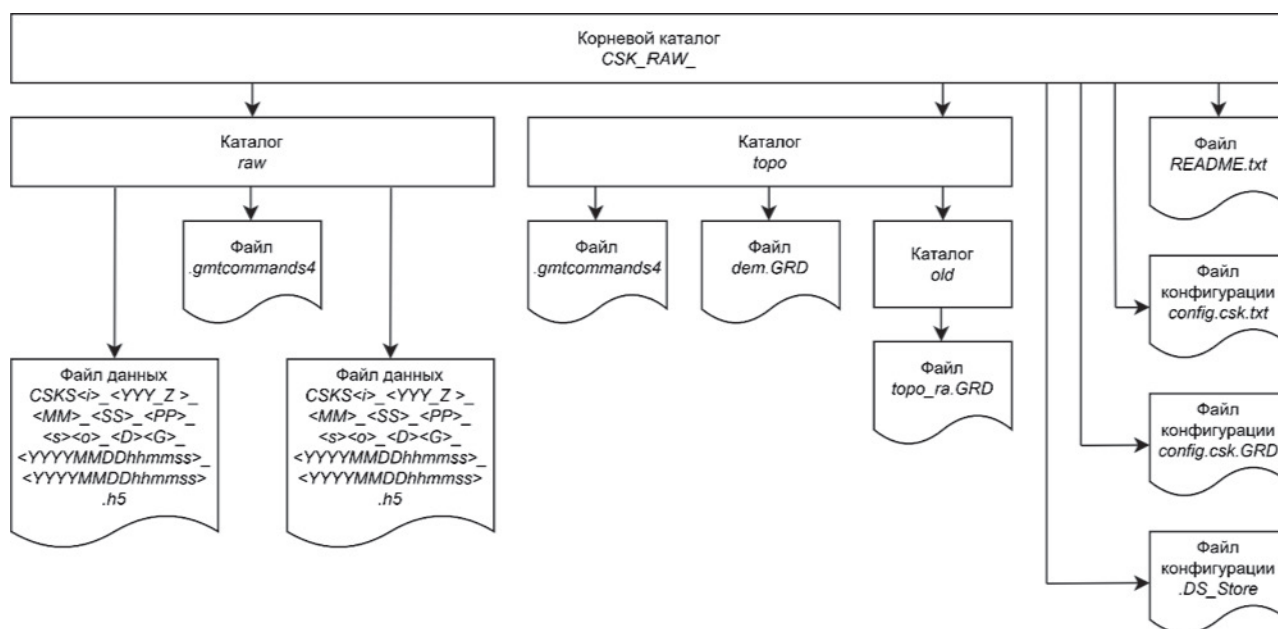


Рис. 1. Иерархия файлов продукта 1A системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

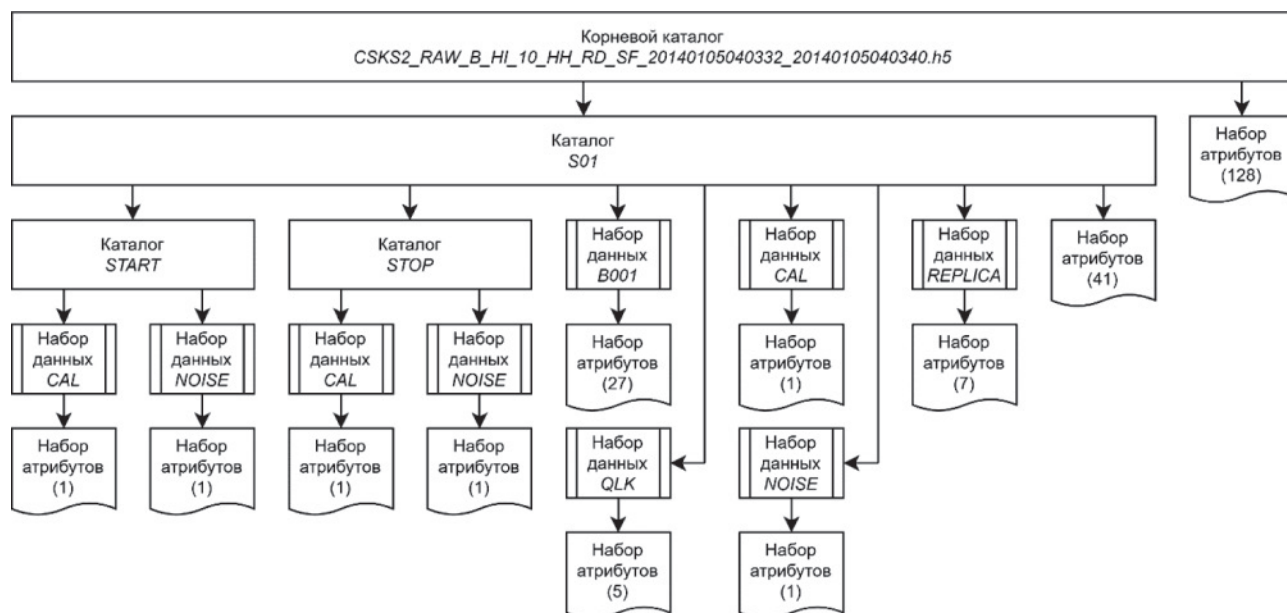


Рис. 2. Структура продукта нулевого уровня системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

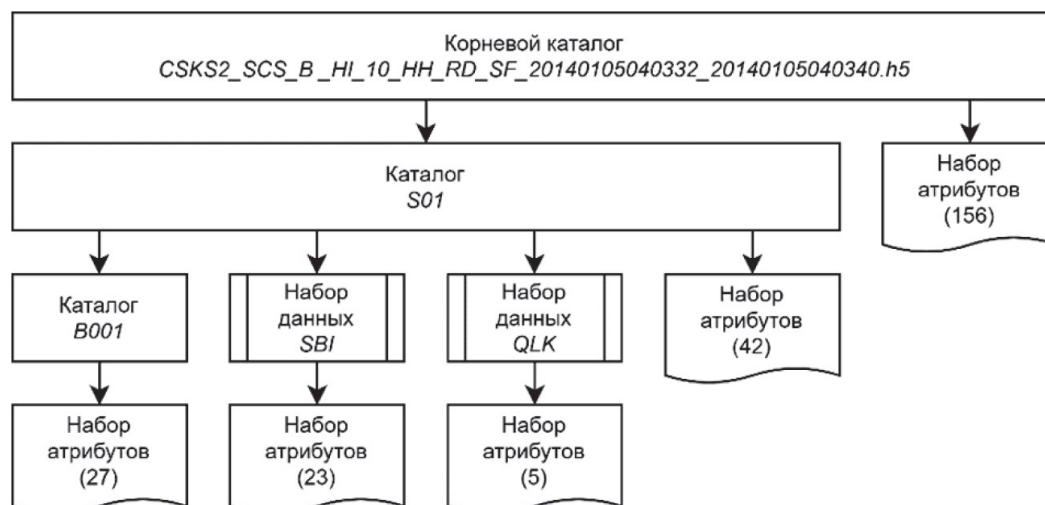


Рис. 3. Структура продукта уровня 1A системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

с помощью опорного ЛЧМ-сигнала, на основе которого строится опорная функция. Опорная функция по азимуту формируется на основе параметров сжатой по дальности РГГ, параметрах спутника (скорость, высота над поверхностью) и оборудования (длина антенны, частота радиолокатора и зондирующих импульсов). Сжатие по азимуту также происходит в частотной области.

Алгоритм фокусировки состоит из ряда последовательно выполняемых шагов, выполняемых над радиолокационными данными, содержащимися в продукте нулевого уровня COSMO-SkyMed:

1. Чтение трехмерного набора отсчетов РГГ (два канала) и его конвертация в массив комплексных чисел, а также удаление невалидных отсчетов – пропущенных строк, которые обусловлены ошибками, возникающими при съеме данных с радиолокатора, на основе атрибутов RAW Missing Blocks Start Lines (номера строк, с которых начинаются некорректные фрагменты) и RAW Missing Lines per Block (количество строк для каждого такого фрагмента). Перевод данных в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

2. Чтение массива, который содержит ЛЧМ-сигнал, преобразование в комплексный вектор и построение на его основе опорной функции по дальности. Вектор ЛЧМ-сигнала многократно дублируется в двумерный массив, после чего подвергается операции БПФ и комплексно-сопряженному преобразованию.

3. Сжатие по дальности осуществляется путем поэлементного перемножения опорной функции, полученной в п. 2, с РГГ в частотной области, после чего результат преобразуется обратно во временную область с помощью операции ОБПФ с отбрасыванием не валидных столбцов, число  $N$  которых определяется на основе атрибутов Range Chirp Length (длительность ЛЧМ-сигнала) и Sampling Rate (частота дискретизации):

$$N = \lceil \text{Range Chirp Length} \times \text{Sampling Rate} \rceil \quad (1)$$

где  $\lceil * \rceil$  – операция округления до ближайшего целого.

4. Вычисление параметров, необходимых для формирования опорной функции по азимуту на основе атрибутов продукта нулевого уровня и характеристик сжатой по дальности РГГ: доплеровская центральная частота и скорость ее изменения, значения «медленного времени» (Slow Time), частота зондирующих импульсов, а также количество не валидных отсчетов по азимуту  $M$ , которое определяется на основе атрибута PRF (частота повторения импульсов):

$$M = \lceil \text{Slow Time} \times \text{PRF} \rceil \quad (2)$$

где  $\lceil * \rceil$  – операция округления до ближайшего большего целого.

5. Расчет опорной функции по азимуту для каждой строки РГГ, перевод результирующего сигнала в частотную область и комплексно-сопряженное преобразование.

6. Сжатие по азимуту осуществляется аналогично сжатию по дальности для сжатой по дальности РГГ в частотной области, последующим ОБПФ и отбрасыванием  $M$  невалидных строк.

Таким образом, на основе данных продукта нулевого уровня COSMO-SkyMed может быть получено сфокусированное РЛИ, соответствующее продукту уровня 1A.

Модель формирования HDF5 включает в себя чтение промежуточных данных (сфокусированное РЛИ), перенос атрибутов из продукта нулевого уровня в продукт уровня 1A и вычисление недостающих значений на их основе.

Алгоритм формирования файла продукта COSMO-SkyMed состоит из ряда последовательно выполняемых шагов, выполняемых над продуктом нулевого

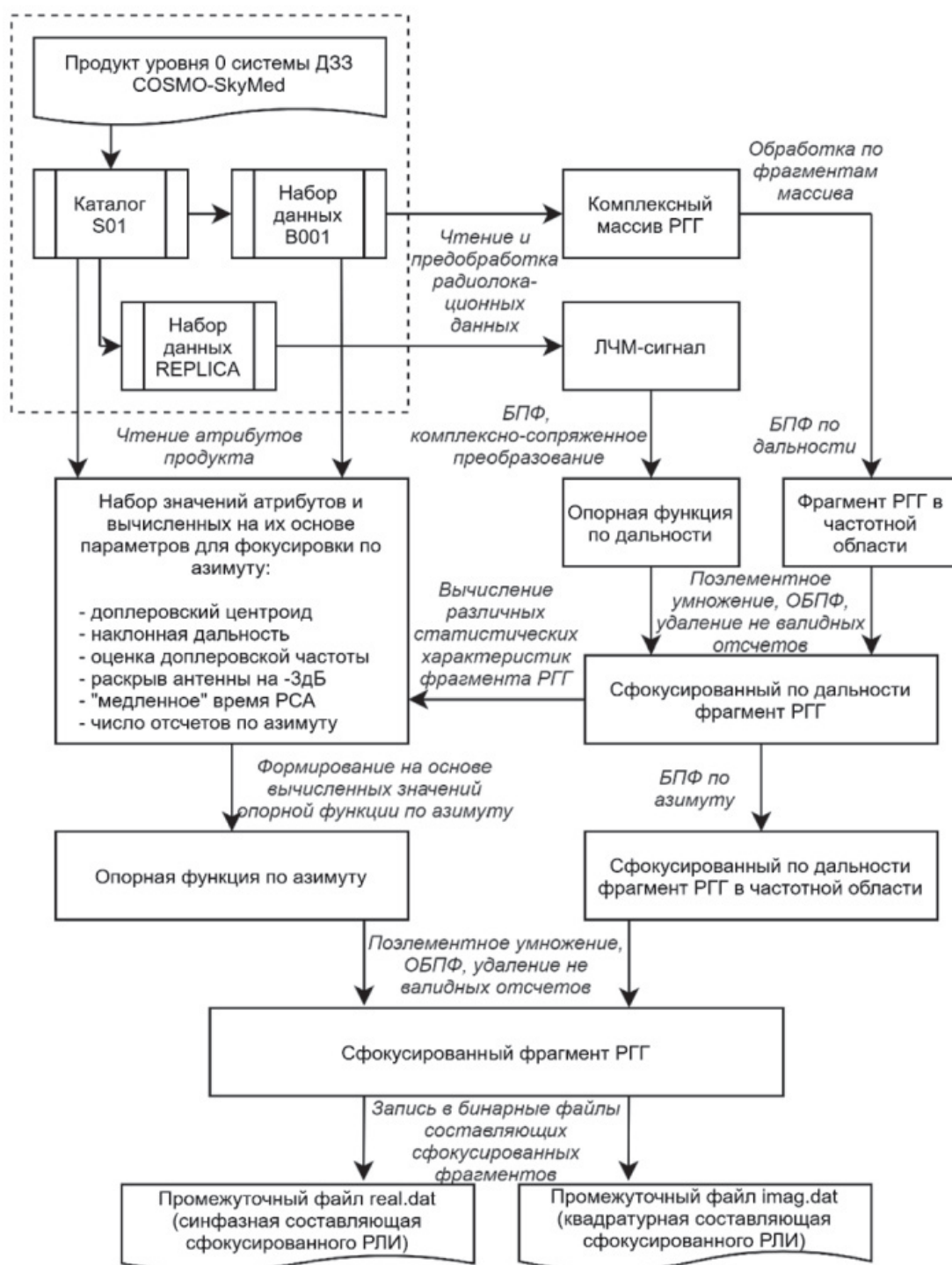


Рис. 4. Модель фокусировки РГГ продукта нулевого уровня системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

Таблица 2

Определенные спецификацией атрибуты COSMO-SkyMed

| Атрибут                            | Значение |
|------------------------------------|----------|
| <i>PSLR</i>                        | -22 дБ   |
| <i>SSLR</i>                        | -22 дБ   |
| <i>ISLR</i>                        | -12 дБ   |
| <i>IRF Shape: -6 dB / -3 dB</i>    | 1.39     |
| <i>IRF Shape: -10 dB / -3 dB</i>   | 1.75     |
| <i>Local Radiometric Stability</i> | 0.5      |

Листинг 1

Функция WriteToFile()

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>function N =<br/>    WriteToFile(IMG, N, f1, f2,<br/>                Valid_Azimuth, Valid_Range)<br/>    IMG = abs(IMG(1: Valid_Azimuth, :));<br/>    if (N == 0)<br/>        fwrite(f1,<br/>            uint16(Valid_Azimuth), 'uint16');<br/>        fwrite(f1, uint16(Valid_Range), 'uint16');<br/>        N = N + 1;<br/>    end<br/>    fwrite(f1, real(IMG(:)), 'double');<br/>    fwrite(f2, imag(IMG(:)), 'double');<br/>end</pre> | <p>% функция принимает фрагмент<br/>РЛИ, его номер, файлы для записи<br/>и размеры блока данных</p> <p>% удаление не валидных отсчетов</p> <p>% особое поведение на 1 итерации</p> <p>% запись в один из файлов<br/>заголовка, который содержит<br/>размерность блоков</p> <p>% увеличение значения счетчика на</p> <p>% запись синфазной составляющей</p> <p>% запись квадратурной<br/>составляющей</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

уровня и полученным из него сфокусированным РЛИ:

1. Создание файла HDF5 и формирование в нем структуры продукта уровня 1A путем создания необходимых каталогов и наборов данных.
2. Запись РЛИ в соответствующий набор данных SBI согласно спецификации продукта уровня 1A COSMO-SkyMed.
3. Перенос всех совпадающих атрибутов из продукта нулевого уровня в продукт уровня 1A, включая имя, значение и адрес. Поскольку оба продукта относятся к одной и той же системе ДЗЗ, количество таких атрибутов составляет большую их часть.

4. Формирование атрибутов, отсутствующих в продукте нулевого уровня. Значительная часть таких атрибутов содержится в наборе данных SBI. Значения могут быть получены различными способами:
  - атрибуты Line Spacing и Column Spacing (ур. 1A: адрес /S01/SBI) могут быть вычислены на основе данных Azimuth Coverage и Ground Range Coverage (ур. 0: адрес /) и размерности сфокусированного РЛИ Lines per Burst и Echo Sampling Window Length (ур. 0: адрес /S01).
  - атрибуты Equivalent Column Time Interval и Equivalent Line Time Interval (ур. 1A: адрес /S01)

## Функция TransportAttributes()

|                                            |                                       |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>function TransportAttributes(</i>       | % функция принимает структуру         |
| <i>info, IGNOR,</i>                        | атрибутов выбранного каталога, номера |
| <i>from, to,</i>                           | исключений, название каталога, файлы  |
| <i>file_1, file_0)</i>                     | продуктов уровней 0 и 1A              |
| <i>ATTRIBUTES_SIZE = size(info);</i>       | % считывается количество атрибутов    |
| <i>for i = 1:ATTRIBUTES_SIZE(1)</i>        | % цикл по атрибутам каталога уровня 0 |
| <i>finding = false;</i>                    | % флаг обнаружения исключения         |
| <i>for j = 1:length(IGNOR)</i>             | опущен                                |
| <i>if (IGNOR(j) == i)</i>                  | % цикл по списку номеров исключений   |
| <i>finding = true;</i>                     | % если исключение обнаружено          |
| <i>break;</i>                              | % флаг обнаружения поднимается        |
| <i>end</i>                                 | % поиск прекращается                  |
| <i>end</i>                                 | % если исключение не было             |
| <i>if (finding == false)</i>               | обнаружено                            |
| <i>h5writeatt(file_1, from,</i>            | % атрибут переносится в файл продукта |
| <i>info(i).Name, h5readatt(file_0, to,</i> | уровня 1A с тем же именем и значением |
| <i>info(i).Name));</i>                     |                                       |
| <i>end</i>                                 |                                       |
| <i>end</i>                                 |                                       |
| <i>end</i>                                 |                                       |

наследуются в Column Time Interval и Line Time Interval (ур. 0: адрес /S01/SBI);

– комплекс Estimated Geodetic Coordinates (ур. 0: адрес /) наследуется в аналогичные атрибуты Geodetic Coordinates (ур. 1A: адрес /S01/SBI);

– различные статистические данные, например: Image Min, Image Mean, Image Max, Image Standard Deviation (ур. 1A: адрес /S01/SBI) и другие могут быть вычислены на основе сфокусированного РЛИ с помощью стандартных инструментов обработки массивов, предоставляемых различным специализированным ПО.

– некоторые атрибуты определены спецификацией продукта, хотя и отсутствуют в виде атрибутов в продукте нулевого уровня (табл. 2)

Таким образом, на основе данных продукта нулевого уровня COSMO-SkyMed и сфокусированного РЛИ может быть получен файл продукта уровня 1A.

### Особенности программной реализации модели

Алгоритм фокусировки РЛИ и формирования продукта уровня 1A выполнен в программной среде MatLab в форме двух последовательно выполняемых скриптов.

Программная реализация модели алгоритма фокусировки RDA, показана на рис. 4. Ключевой особенностью алгоритма является обработка РГТ по частям, что вызвано ее большим размером, превышающим характерный объем памяти современных оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), вследствие чего реализация процесса фокусировки для полного исходного массива невозможна.

Предлагаемый способ работы в условиях аппаратных ограничений реализует использование промежуточных бинарных файлов, которые отдельно

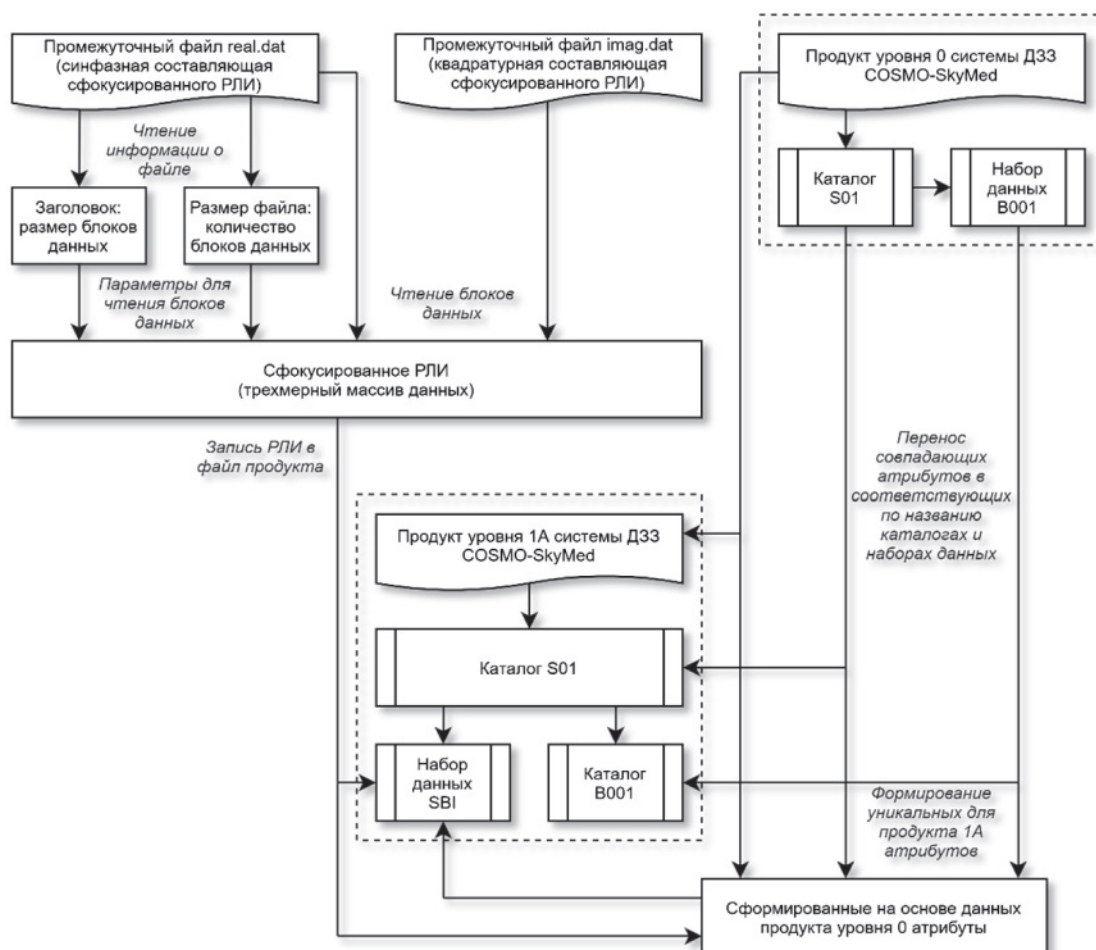


Рис. 5. Модель формирования файла продукта уровня 1А системы ДЗЗ COSMO-SkyMed

хранят каналы сфокусированного РЛИ и обновляются по мере обработки очередного фрагмента РГГ. Используется функция WriteToFile (листинг 1).

Программная реализация модели формирования целевого файла HDF5 показана на рис. 5. Особенностью алгоритма является загрузка РЛИ из бинарных файлов, полученных на предыдущем шаге, и способ автоматизированного переноса соответствующих атрибутов между файлами продуктов, который реализован в функции TransportAttributes(), которая принимает на вход набор всех атрибутов текущего каталога и номера тех из них, которые не должны быть перенесены в продукт уровня 1А (листинг 2).

### Результаты моделирования

Визуальный анализ получаемого в результате работы алгоритма комплексного изображения может быть осуществлен путем его объединения в

двумерный массив и проведения операции геометрической коррекции, которая уменьшает влияние спекл-шума за счет усреднения значений соседних отсчетов РЛИ. Результат такого преобразования (рис. 6) может быть сопоставлен со вспомогательным массивом продукта нулевого уровня QLK (Quick Look Image), содержащим сфокусированное РЛИ в небольшом разрешении с помощью собственного алгоритма, используемого системой COSMO-SkyMed (рис. 7).

Оценка работы программной реализации модели, формирующей конечный продукт уровня 1А, может быть дана с помощью специализированного ПО, например, приложения NEST 5.1 [9]. Сформированный продукт должен быть корректно открыт, его данные – правильно интерпретированы, и над ними можно производить операции, которые приведут к очевидно валидным результатам. Результат открытия файла в NEST 5.1: приложением автоматически сформи-



Рис. 6. Сфокусированное РЛИ на основе данных продукта нулевого уровня

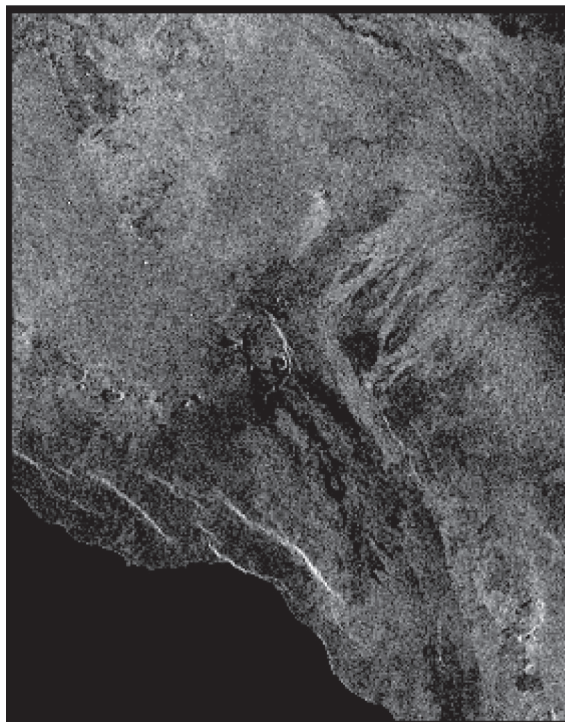


Рис. 7. Набор данных QLK продукта нулевого уровня

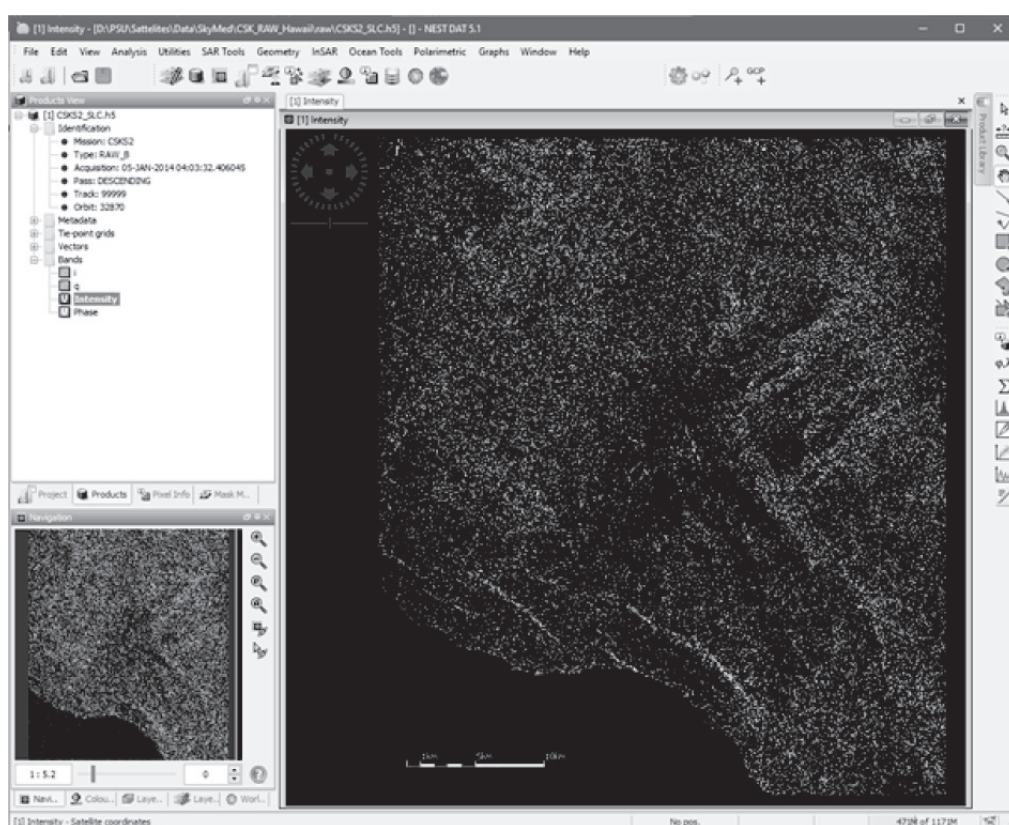


Рис. 8. Скриншот приложения NEST 5.1 с открытым продуктом уровня 1A COSMO-SkyMed

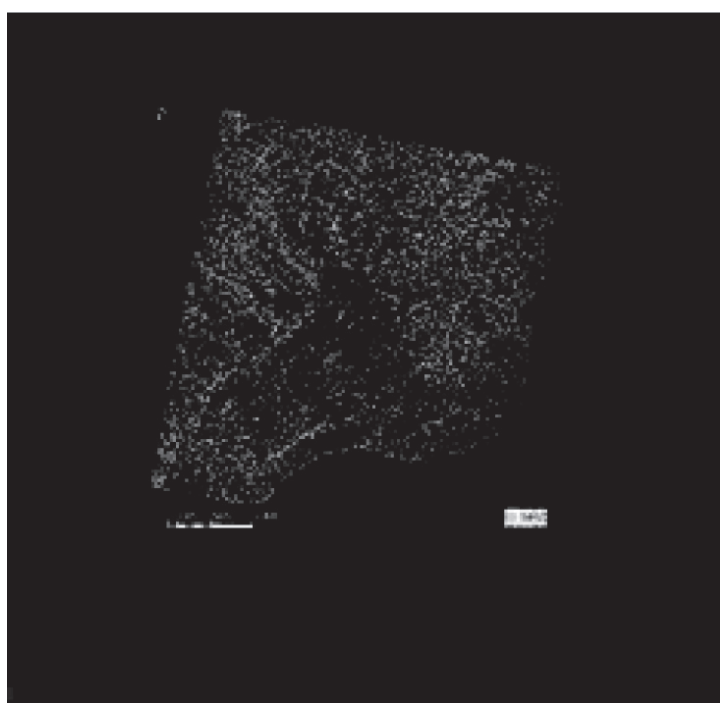


Рис. 9. РЛИ после геометрической коррекции (инструмент *Reprojection*), наложенное на карту Земли (ПО NEST 5.1)

рован заголовок и наборы данных на основе РЛИ продукта (рис. 8).

Проверка продукта осуществляется с помощью инструмента Reprojection [10], который выполняет геометрическую коррекцию РЛИ таким образом, чтобы оно могло быть наложено на карту поверхности Земли, предоставляемую самим приложением. Используется информация о координатах 4 крайних точек РЛИ. Результат обработки показан на рис. 9, из которого видно, что контуры береговой линии, наблюдаемые на РЛИ, совпадают с аналогичными особенностями ландшафта подложенной карты. Из этого следует, что координаты РЛИ в принципе обработаны корректно, поскольку геодезическая привязка данных осуществлена к нужной области Земли с сохранением правильной ориентации изображения.

Таким образом, продукт уровня 1А сформирован корректно на основе данных продукта нулевого уровня системы ДЗЗ COSMO-SkyMed, и может быть использован для дальнейшей обработки.

## Заключение

Разработана модель синтеза радиолокационных данных в стандартизированный формат HDF5 с учетом особенностей набора метаданных и иерархии формата. Представлена программная реализация модели, выполненная в среде MatLab, приведены результаты моделирования формирования РЛИ и набора метаданных уровня 1А для необработанных данных спутниковой системы COSMO-SkyMed, показана возможность их дальнейшей тематической обработки с использованием специализированного программного обеспечения NEST 5.1.

Модель включает следующие шаги: предварительная обработка данных нулевого уровня, расчет параметров для фокусировки, фокусировка по дальности и по азимуту, перенос атрибутов из продукта нулевого уровня, расчет и запись атрибутов для продукта уровня 1А, представление радиолокационных данных в формат HDF5.

Разработанная модель позволяет выполнить синтез радиолокационного изображения и обеспечивает возможность дальнейшей его тематической обработки.

## Литература

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Адамовский, Е. Р. Преобразование выходного продукта системы дистанционного зондирования Земли SENTINEL-1 в формат HDF5 / Е.Р. Адамовский, Р.П. Богуш // Информатика и Космос. – 2019. – № 4. – С. 102–113.

3. COSMO-SkyMed Web Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm> [дата обращения: 28.01.2017], свободный. – Загл. с экрана.

4. COSMO-SkyMed Mission and Products Description [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description\\_rev3-2.pdf](https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description_rev3-2.pdf) [дата обращения: 28.12.2020], свободный. – Загл. с экрана.

5. Адамовский, Е. Р. Алгоритм представления метаданных и сфокусированных радиолокационных данных в формат HDF5 / Е.Р. Адамовский, Р.П. Богуш // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 19–29.

6. HDF5 Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://portal.hdfgroup.org/display/HDF5/HDF5> [дата обращения: 28.12.2020], свободный. – Загл. с экрана.

7. Curlander, J. C. Synthetic Aperture Radar: Systems & Signal Processing / J.C. Curlander, R.N. McDonough. – New York: John Wiley & Sons, 1991. – 672 p.

8. Ушенкин, В. А. Анализ алгоритмов фокусировки радиолограмм от космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны / В.А. Ушенкин // Информатика и прикладная математика. – 2014. – № 20. – С. 95–100.

9. ESA NEST 5.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earth.esa.int/web/nest/news/-/article/nest-5-1-released> [дата обращения: 28.12.2020], свободный. – Загл. с экрана.

10. NEST 5.1 User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earth.esa.int/documents/507513/1077939/nest+user+manual+5.1> [дата обращения: 28.12.2020], свободный. – Загл. с экрана.