

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИХ ПЕРЕДАЧИ И ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

кан. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ, И.Ю. ЗАХАРОВА, В.М. ЧЕРТКОВ
(Полоцкий государственный университет);

кан. техн. наук Н.М. НАУМОВИЧ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)

Выполнено моделирование алгоритмов обработки данных радиолокатора с синтезом апертуры космического аппарата, включая сжатие, пакетирование, синхронизацию и помехоустойчивое кодирование для передачи по каналу связи при воздействии шумов и их восстановление на приемной стороне с последующим формированием радиолокационного изображения. Синтезирована структурная схема модели, реализованная в пакете MatLab. В качестве входных сигналов использовались необработанные данные спутника ERS-1. Для сжатия применен модифицированный алгоритм на основе энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования. Помехоустойчивое кодирование выполняется с помощью кодов Рида – Соломона. Представлены сфокусированные радиолокационные изображения по восстановленным данным радиолокатора с синтезом апертуры при моделировании различного уровня шумов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка и передача радиолокационных данных.

Введение. Обеспечение возможности обработки больших потоков данных в реальном времени и надежного их приема является одним из приоритетных требований к современной аппаратуре систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе радаров с синтезированной апертурой (РСА), которые позволяют получать изображения практически в любых условиях съемки. Однако выполнение требований по повышению качества изображений таких систем приводит к тому, что объем данных, формируемый расположенной на борту аппаратурой, неуклонно увеличивается, что порождает проблему их хранения и передачи на приемный пункт на Земле в течение сеанса связи [1]. Успешное решение данной задачи может быть обеспечено применением наиболее эффективных методов обработки, что предопределяет необходимость моделирования алгоритмов и оценки полученных результатов.

1. Модель обработки данных. Для обеспечения быстродействия, надежности и достоверности передачи телеметрических и радиолокационных данных от космического аппарата к приемнику наземного пункта используется сжатие исходных данных, пакетирование и помехоустойчивое кодирование. В соответствии с рекомендациями консультативного комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) [2] синтезирована модель обработки данных РСА космического аппарата (рисунок 1), которая включает блок основных данных РСА и метаданных, кодер источника, блок перестановки данных, формирователь пакетов, помехоустойчивый кодер, блок формирования сигналов синхронизации, формирователь кадра, модулятор, блок генерации ошибок, демодулятор, блок выделения синхросигналов, помехоустойчивый декодер, блок восстановления пакета, блок перестановки данных, декодер источника, блок фокусировки данных.

Кодер источника предназначен для сокращения объема передаваемой информации и может использовать алгоритм на основе блочного адаптивного квантования или на основе энтропийно-ограниченного блочного квантования [3].

Для обеспечения надежности и достоверности передачи телеметрических и радиолокационных данных от космического аппарата к приемнику наземного пункта используется пакетная передача и помехоустойчивое кодирование. На основе рекомендаций консультативного комитета по космическим системам передачи данных пакет данных РСА космического базирования формируется на основе SPP (Sparse Packet Protocol [4]). При этом используется блок перестановки данных, т.к. в соответствии с SPP требуется перестановка отсчетов сигналов с соблюдением очередности: сначала синфазные части четных и нечетных отсчетов, затем квадратурные части четных и нечетных отсчетов. Формирователь пакетов создает пакет данных РСА.



Рисунок 1. – Модель обработки данных RCS космического аппарата для их передачи и формирования радиолокационного изображения

Современные методы помехоустойчивого кодирования, рекомендуемые CCSDS к использованию в телеметрических системах, обеспечивают уровень ошибок восстановления сигнала практически близкий к минимально достижимой границе Шеннона. Согласно рекомендациям комитета CCSDS, может применяться код Рида – Соломона (РС-код) или турбокод [2]. Для обеспечения возможности обнаружения кодовых слов в передаваемом потоке данных на приемной стороне и их правильного декодирования применяются сигналы синхронизации. Для модуляции битового потока закодированных данных, согласно рекомендации CCSDS, применяют четырехпозиционную фазовую модуляцию со сдвигом квадратур (OQPSK). Отличие данного вида модуляции от QPSK-модуляции заключается в сдвиге квадратурной составляющей на один бит, что приводит к одинаковой скорости передачи символов закодированного сообщения со входной последовательностью [5]. Для кодирования одним символом двух бит информации необходимо, чтобы сигнальное созвездие переходов состояло из четырех точек.

2. Результаты экспериментов. Представленная на рисунке 1 схема модели обработки данных RCS космического аппарата для их передачи и формирования радиолокационного изображения реализована в прикладном пакете MatLab. Для этого разработаны и используются следующие основные функции:

- importdata – загрузка данных;
- dec2bin_new32 – перевод из десятичной системы исчисления в двоичную дробных и отрицательных чисел;
- bin2dec_new32 – обратная функция;
- esbaq_enc – выполнение кодирования на основе энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования;
- length – возвращение максимального размера массива;
- comm.OQPSKModulator и comm.OQPSKDemodulator – инициализация объектов OQPSK-модулятора и демодулятора соответственно;
- comm.RSEncoder и comm.RSDDecoder – инициализация объектов кодера и декодера Рида – Соломона соответственно;
- comm.AWGNChannel – инициализация объекта имитирующего физический канал передачи данных;
- step – обращение к инициализированным объектам;
- circshift – осуществление циклического сдвига;
- fwrite – запись данных в файл;

- pos_syn_search – поиск последовательности синхронизации;
- comm.ErrorRate – инициализация системного объекта подсчета символьных ошибок в указанных последовательностях;
- esbaq_enc – восстановление данных после энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования;
- ref_r – формирование опорной функции по дальности;
- compr_r – сжатие данных по дальности;
- dop_centr_fr – определение центральной доплеровской частоты;
- chirp_az – расчет фазы переданного сигнала по азимуту и формирование опоры по азимуту;
- ref_az – формирование опорной функции по азимуту для каждого отсчета по дальности с использованием для этого функции chirp_az;
- r_migr – компенсация миграции дальности;
- compr_az – сжатие по азимуту;
- fwrite – запись информации в бинарные файлы;
- fft – вычисление дискретного преобразования Фурье;
- ifft – выполнение обратного преобразования Фурье.

В качестве входных отсчетов использовались 8-битные необработанные данные PCA ERS-1 [3]. Для упрощения доступа к данным и исключения переполнения буфера памяти из-за большого объема входных данных синфазные и квадратурные выборки представлены в виде таблиц, записанных в двоичные MAT-файлы. Дальнейшая обработка для каждого файла выполняется отдельно. Для сжатия радиолокационных данных в модели применен модифицированный алгоритм на основе энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования [3].

Процедура пакетирования данных при моделировании выполняется в цикле, количество повторений которого соответствует количеству строк радиолокационного изображения [4]. Структура полного пакета в модели включает 1573 бита метаданных, а размер радиолокационных данных определяется длиной строки радиолокационного изображения. К основным метаданным, необходимым для фокусировки изображения, относятся длина волны радиолокатора, частота следования импульсов, частота дискретизации импульсов, длительность импульсов, длительность строба дальности, вектор скорости по трем координатам X , Y и Z , количество отсчетов по дальности, количество отсчетов по азимуту. Соответственно, пакет данных включает:

- основной заголовок пакета с 0 по 48 бит, который содержит номер версии пакета, тип пакета, флаг дополнительного заголовка, идентификатор обработки, категорию данных пакета, значение флага для группировки пакетов, счетчик пакетов, длину данных пакета;
- поле вспомогательных данных PCA с 49 по 1622 бит, включающее следующие параметры: длину волны радиолокатора, частоту следования импульсов, частоту дискретизации импульсов, длительность импульсов, длительность строба дальности, вектор скорости по трем координатам X , Y и Z , количество отсчетов по дальности, количество отсчетов по азимуту, количество байт, занимаемых префиксом, значения среднеквадратичного отклонения для мнимой и действительной части отраженного сигнала PCA;
- данные отсчетов отраженного сигнала записываются с 1623 по 34391 бит.

Для помехоустойчивого кодирования, согласно рекомендациям комитета CCSDS, применяется РС-код, т.к. при этом генерируется меньший объем выходного кода по сравнению со сверточным кодированием.

РС-коды представляют собой недвоичные циклические коды, символы которых являются собой элементы поля Галуа $GF(q)$, где $q = 2^m$ – это порядок поля, m – степень поля Галуа. Данные коды определены на всех m -битных символах при всех n и k , в случае если для них верно неравенство [5]

$$0 < k < n < 2^m - 1, \quad (1)$$

где k – количество информационных символов, которое подлежит операции кодирования;
 n – общее число кодовых символов в кодируемом блоке.

В большинстве случаев справедливо следующее равенство:

$$(n, k) = (q - 1, q - 1 - 2 \cdot t), \quad (2)$$

где t – количество исправляемых ошибок.

Из выражения (2) следует, что

$$n - k = 2 \cdot t = r, \quad (3)$$

где r – число контрольных (проверочных) символов.

В соответствии с CCSDS параметры кода Рида – Соломона определяются как (255,223) при $m = 8$. Это означает, что число проверочных символов составляет $r = 32$ байта. Учитывая выражение (3), данный код может исправить любые 16 символов (байт). Таким образом, код может исправить 128 битовых ошибок, но распределенных не более чем в 16 байтах (символов).

В связи с тем, что длина кодового слова составляет 255 байт, а длина сформированного для передачи пакета в разы больше, поэтому необходимо кадрировать входные данные в соответствии с количеством информационных символов РС-кода.

Для обеспечения обнаружения кодовых слов в передаваемом потоке данных на приемной стороне и их правильного декодирования применяется маркер синхронизации при формировании кадра для передачи по физическому каналу. Маркер синхронизации для сверточного кода и кода Рида – Соломона является постоянным, имеет длину 4 байта, добавляется в начало каждого кодового слова и принимает значение 1ACFFC1D [6]. В результате кадр состоит из 259 байт.

Для модуляции битового потока закодированных данных применяется четырехпозиционная фазовая модуляция со сдвигом квадратур (OQPSK) [7]. Для моделирования воздействия шумов на передаваемый сигнал используется модель канала с «белым» шумом, мощность которого можно задавать отношением сигнал/шум (SNR – SignalNoise Ratio), относительно сигнала, на который происходит наложение шума. В цифровых системах связи используется отношение E_b/N_0 , где E_b – энергия одного бита информации, N_0 – спектральная плотность мощности белого шума в канале.

Задаваемое значение E_b/N_0 влияет на количество ошибок, вносимых в передаваемый кадр, путем разброса данных в окрестностях четырех позиций созвездия. Чем ниже значение E_b/N_0 , тем больше разброс точек и тем самым больше вероятность возникновения битовой ошибки в канале связи. Канал с «белым шумом» равномерно распределяет битовые ошибки относительно каждой точки созвездия, что может привести к одинаковому количеству байтовых ошибок и битовых, т.е. битовые ошибки могут равномерно распределиться по всей длине кодового слова, по одной в байте.

На приемной стороне для выделения маркеров синхронизации используется беспискавая синхронизация на основе установления схожести последовательности демодулированных битов с заданной последовательностью синхромаркера, при этом полученное максимальное значение характеризует тактовую задержку всей принимаемой последовательности. Далее находятся границы начала кодового слова, удаляется маркер синхронизации, что позволяет выделить 255 байтов закодированных помехоустойчивым РС-кодом данных. На данном этапе для оценки работы помехоустойчивого декодера РС-кода определяется количество битовых ошибок после процедуры демодуляции.

Для правильного восстановления пакета необходим сбор статистики ошибок, которые не смог исправить помехоустойчивый код, а также вычисление вероятности возникновения символьной и битовой ошибки в канале передачи данных с заданным коэффициентом E_b/N_0 .

На рисунке 2, а представлено созвездие сигнала на выходе OQPSK-модулятора реализованной модели, а на рисунке 2, б приведено созвездие принятого сигнала при моделировании шума в физическом канале с коэффициентом $E_b/N_0 = 9$ дБ.

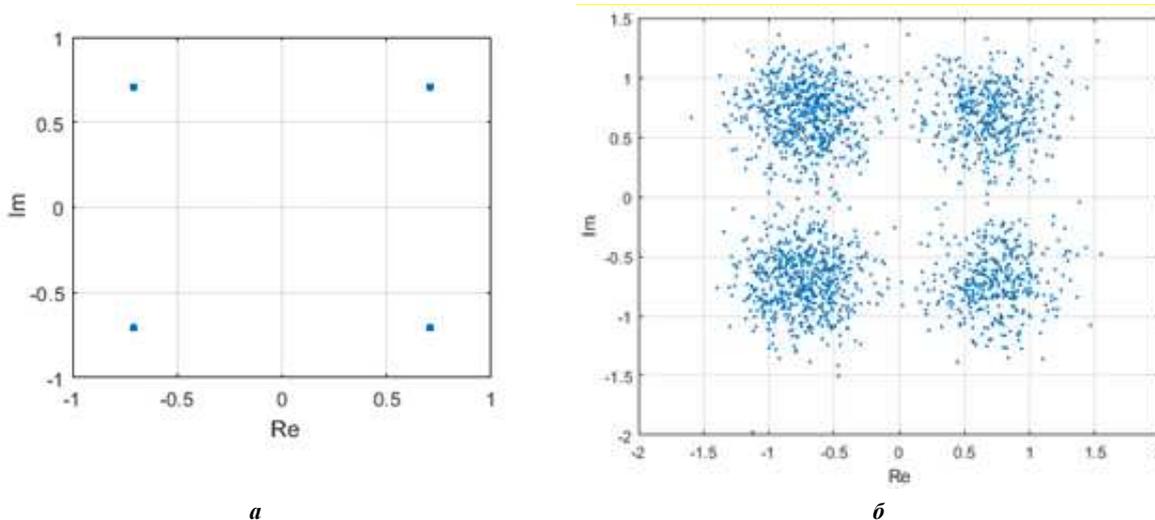


Рисунок 2. – Созвездия OQPSK-сигналов:
 а – исходного сигнала; б – принятого сигнала при $E_b/N_0 = 9$ дБ

На рисунке 3 представлен график зависимости количества вносимых битовых ошибок в физическом канале связи от коэффициента E_b/N_0 при моделировании.

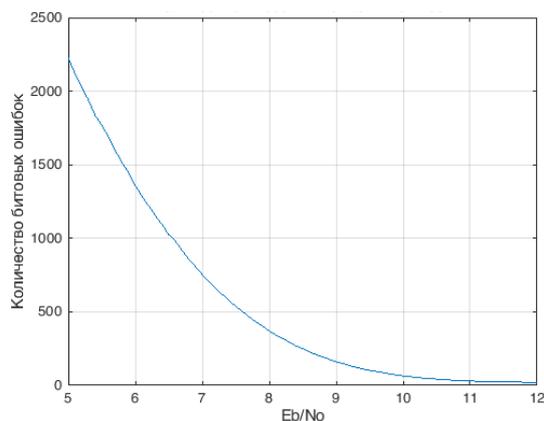


Рисунок 3. – Зависимость количества внесенных битовых ошибок от коэффициента E_b/N_0

В результате моделирования физического канала связи получена зависимость количества неисправленных символьных ошибок от коэффициента E_b/N_0 , которая представлена на рисунке 4.

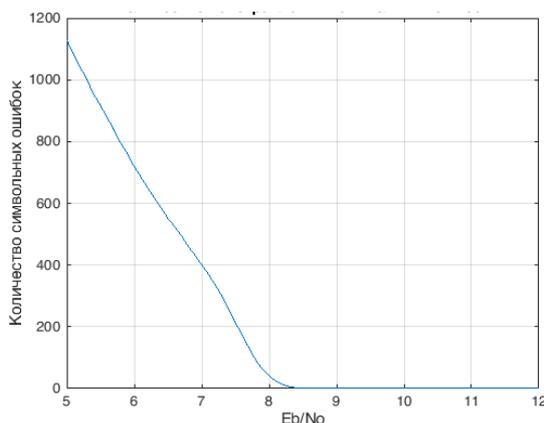


Рисунок 4. – Зависимость количества неисправленных символьных ошибок после помехоустойчивого декодирования от коэффициента E_b/N_0

Из рисунка 4 видно, что при приближении к величине $E_b/N_0 = 8,5$ дБ количество неисправленных символьных ошибок стремится к минимуму и для определения точной границы полного исправления ошибок требуется более детальный анализ. Для чего в таблице 1 представлены результаты моделирования для определения помехоустойчивости в интервале коэффициента E_b/N_0 от 8,5 дБ до 9,5 дБ с дискретностью 0,1.

Таблица 1. – Результаты исследования помехоустойчивости

E_b/N_0 , дБ	N_{BE}	P_{ESYM}	N_{error}
8,5	12,09	0,000179	0,039976
8,6	11,02	6,95E-05	0,015500
8,7	10,03	2,54E-05	0,005666
8,8	9,13	8,38E-06	0,001868
8,9	8,27	2,20E-06	0,000490
9	7,49	3,41E-07	0,000076
9,1	6,76	1,39E-07	0,000031
9,2	6,10	1,21E-07	0,000027
9,3	5,47	1,00E-12	0
9,4	4,92	1,00E-12	0
9,5	4,40	1,00E-12	0

Следует отметить, что был проведен 1 000 000 вычислительных экспериментов для каждого значения E_b/N_0 . Числовые значения количества внесенных битовых ошибок (N_{BE}) подсчитывались как среднее значение от суммы всех внесенных битовых ошибок на протяжении всех проведенных экспериментов. Учитывая, что в каждом эксперименте передается 2072 бита, то максимальное число ошибок составляет $2072 \cdot 10^6$. Кроме того, были определены вероятность возникновения символьной ошибки (P_{ESYM}) и количество неисправленных символьных ошибок (N_{error}), значения которых рассчитывались аналогично с учетом того, что в каждом проведенном эксперименте передавалось 223 символа.

Анализ таблицы 1 показывает, что для $E_b/N_0 = 9,3$ дБ при применении РС-кода (255,223) количество неисправленных символьных ошибок значительно уменьшается и практически равно нулю.

Для моделирования процедуры формирования изображения применяется метод на основе алгоритма быстрой свертки с компенсацией миграции дальности с использованием быстрого преобразования Фурье [8]. На рисунке 5 для данных из [9] представлены радиолокационные изображения, полученные на выходе разработанной модели, для различных значений коэффициента E_b/N_0 .

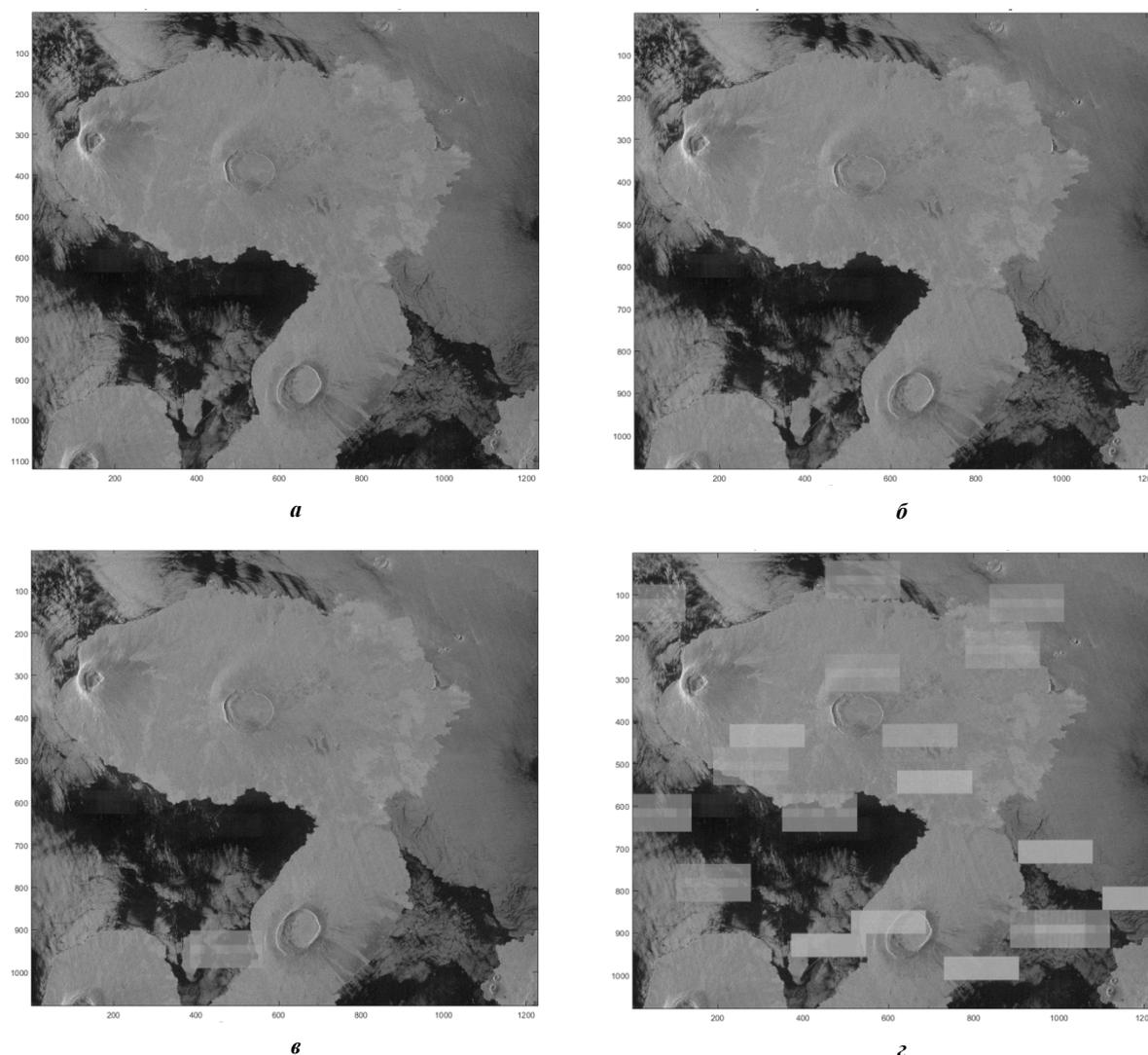


Рисунок 5. – Сфокусированные изображения:
а – для $E_b/N_0 = 10$ дБ; б – для $E_b/N_0 = 9,3$ дБ; в – для $E_b/N_0 = 9,0$ дБ; г – для $E_b/N_0 = 8,8$ дБ

Найденное значение коэффициента $E_b/N_0 = 9,3$ дБ подтверждается теоретическими расчетами, которые выполнялись с использованием программы «bertool» в Matlab при совместном применении OQPSK-модуляции и помехоустойчивого РС-кода (255,223).

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что модель работает корректно, полученные данные достоверны и согласовываются с данными из [10].

Заключение. Синтезирована структурная схема модели обработки данных РСА космического аппарата для их передачи и восстановления, которая реализована в пакете MatLab. В качестве входных сигналов использованы необработанные данные спутника ERS-1. Для сжатия применен модифицированный алгоритм на основе энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования. Пакетирование выполнено на основе SPP. Помехоустойчивое кодирование осуществлено на основе кодов Рида – Соломона с основными параметрами (255,223). Для обнаружения кодовых слов в передаваемом потоке данных на приемной стороне применен маркер синхронизации при создании кадра. Радиолокационное изображение формируется с помощью метода на основе алгоритма быстрой свертки с компенсацией миграции дальности, используя быстрое преобразование Фурье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования // В.С. Верба [и др.]. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. CCSDS 130.3-G-0.2 : CCSDS Draft Green Book. – Iss. 0.2. – Sagamihara, Japan, 2004.
3. Богущ, Р.П. Моделирование сжатия радиолокационных данных дистанционного зондирования земли модифицированным алгоритмом ЕСВАQ с представлением восстановленной информации в формате CEOS / Р.П. Богущ, И.Ю. Захарова, Н.М. Наумович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2017. – № 12. – С. 9–16.
4. S1-IF-ASD-PL-0007 : Sentinel-I SAR Space Packet Protocol Data Unit. – Iss. 12. – 2014. – 85 p.
5. Егоров, С.И. Повышение эффективности исправления ошибок помехоустойчивыми кодами Рида – Соломона в цифровых телекоммуникационных каналах / С.И. Егоров, Г. Маркарян. – М. : Телекоммуникации, 2005. – 180 с.
6. CCSDS 231.0-B-1. Blue Book : TC Synchronization and Channel Coding. Recommendation for Space Data System Standards. – Iss. 1. – Washington, D.C., 2003.
7. Radio Frequency and Modulation Systems—Part 1: Earth Stations and Spacecraft. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 401.0-B-17. Blue Book. Issue 17. Washington, D.C.: CCSDS, July 2006.
8. Моделирование алгоритма формирования радиолокационного изображения на основе представленных в формате CEOS необработанных данных дистанционного зондирования Земли / Р.П. Богущ [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 13–21.
9. Geohazard Supersites and Natural Laboratories. GEO - Group on Earth Observations. [Electronic resource]. – Mode of access: http://eo-virtual-archive4.esa.int/search/ER01_SAR_IM__0P/html/?name=Franche-Comte. – Date of access: 15.11.17.
10. CCSDS 421.0-G-1. Green Book : Report of the Proceedings of the RF and Modulation Subpanel Meeting at the Ames Research Center. – Iss. 1. – TIEN M. NGUYEN. – 1989.

Поступила 21.09.2018

SPACECRAFT SAR DATA PROCESSING ALGORITHMS MODELING FOR TRANSMITTING AND RADAR IMAGE FORMATION

R. BOHUSH, I. ZAHAROVA, V. CHERTKOV, N. NAUMOVICH

Big data real time processing and robust data transmitting are the major requirements to modern telemetry data transfer hardware. In this paper SAR data processing algorithms such as compression, data packet generation, synchronization and jam-free coding for noisy communication channel and data recovery on receiving side with following radio image focusing are modelled. Structure diagram was implemented in MatLab. Raw data ERS-1 was used as input data. Modified entropy-constrained block adaptive quantization algorithm was used for compression. Noise immunity coding based on Reid-Solomon codes. Radar images based on recovered SAR data with various noise levels are presented.

Keywords: remote sensing system, synthetic aperture radar, signal preprocessing.