

УДК 621.396.94

Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний

Бахтин А.А.*, Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю.*****

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», площадь Шокина, 1,

Москва, Зеленоград, 124498, Россия

**e-mail: bah@miee.ru*

***e-mail: omelia81@gmail.com*

****e-mail: semenova.anastasia.y@gmail.com*

Аннотация

В статье рассматриваются технические характеристики современных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с точки зрения организации радиоканала «Космос-Земля». Выявлена проблема несоответствия достижимой в настоящее время пропускной способности спутникового канала объему передаваемой информации с КА ДЗЗ. Определены перспективные методы повышения пропускной способности и современные тенденции: рассмотрены применяемые методы модуляции и помехоустойчивого кодирования в X-диапазоне частот, а также возможность перехода в K-диапазон. Сделаны выводы о дальнейших перспективах проектирования высокоскоростных радиолиний передачи информации в канале «Космос-Земля» систем ДЗЗ и предложены способы повышения их пропускной способности.

Ключевые слова: высокоскоростная радиолиния, спутниковая радиолиния, дистанционное зондирование Земли, пропускная способность, спектральная эффективность, сигнально-кодовые конструкции.

Введение

В соответствии с программой «Цифровая экономика Российской Федерации» в настоящее время предъявляются новые требования к технологиям беспроводной связи, в том числе к технологиям дистанционного зондирования Земли [1]. ДЗЗ как и технологии спутниковой связи и геопозиционирования, относятся к критическим технологиям, по уровню освоения которых в настоящее время зачастую оценивают степень научного и технического развития страны. Согласно прогнозу долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года объем услуг связи по всем видам деятельности к 2030 году по сравнению с 2011 годом увеличится более чем в 1,5 раза. Доля российских данных дистанционного зондирования Земли в общем объеме данных ДЗЗ, используемых в российских геоинформационных системах, будет неуклонно расти и к 2024 году достигнет 90 % [1]. При этом необходимо будет обеспечить комплексную реализацию совокупных технических возможностей группировки космических аппаратов и наземной инфраструктуры в целях получения наиболее полного объема ДЗЗ-данных требуемого качества [2].

Повышение пространственного разрешения снимков современных ДЗЗ приводит к возрастанию объемов информации, передаваемой на земные станции.

Для соответственного увеличения скорости передачи информации в спутниковых радиолиниях отечественных систем ДЗЗ, аналогичных или превышающих параметры зарубежных аналогов в части разрешения снимков, но отстающих в части систем связи, необходим анализ современных тенденций в области построения спутникового передающего оборудования и поиск перспективных методов построения высокоскоростной линии связи Космос – Земля.

Пропускная способность радиоканала

Факторы, ограничивающие возможность повышения спутниковых радиолиний, условно можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести длительность сеанса связи, особенности конструкции и компоновки КА, т.е. те, которые определяются конструктивными особенностями спутника и выбором орбиты. Вторая группа параметров, таких как коэффициенты усиления антенн, применяемые сигнально-кодовые конструкции (СКК), рабочий диапазон частот и т.д. определяются разработчиком связной аппаратуры. В настоящей статье анализируются возможности организации сверхвысокоскоростных спутниковых каналов связи, поэтому основное внимание будет уделено именно целевым параметрам радиолинии.

Существующие в настоящее время системы передачи информации со спутников ДЗЗ используют ряд частотных диапазонов, таких как L, S, C, X и K. Наибольшей выделенной полосой частот обладают X- и K-диапазоны, при этом X-диапазон рабочих частот, имеющий полосу пропускания 375 МГц на частотах

8025...8400 МГц, является основным для построения высокоскоростных спутниковых систем связи. Выделенная в К-диапазоне рабочих частот полоса шириной 1,5 ГГц на частотах 25500...27000 МГц в перспективе позволяет значительно увеличить скорость передачи информации в радиоканале «Космос – Земля», однако разработчики связной аппаратуры в данном диапазоне сталкиваются с ограничениями элементной базы [3].

В спутниковых системах связи повышение рабочих частот радиолиний позволяет использовать более широкие частотные полосы для достижения более высоких скоростей передачи информации. При этом следует иметь в виду, что повышение рабочей частоты спутниковой радиолинии приводит к увеличению потерь мощности при распространении сигнала, а также к необходимости учитывать существующие в каждом диапазоне ограничения по излучаемой мощности [4]. Таким образом, нельзя ожидать пропорционального повышения скорости передачи данных с увеличением используемой полосы.

Существующие радиолинии спутников ДЗЗ продолжают использовать различные частотные диапазоны в зависимости от требований к системе связи. При выборе частоты, таким образом, учитывается ряд факторов, одним из важнейших среди которых является требование к необходимой скорости передачи информации [5]. Стандартные скорости передачи в X-диапазоне рабочих частот, достигаемые при использовании типовых методов модуляции и кодирования, составляют 150 Мбит/с и 300 Мбит/с, а максимальная пропускная способность спутникового радиоканала достигает 1 Гбит/с в некоторых зарубежных системах

спутниковой связи [3]. В отечественных источниках приводится требование пропускной способности до 1 Гбит/с в ближайшие годы для передачи информации со спутников ДЗЗ с надлежащим качеством. Таким образом, необходимо рассмотреть те решения, которые применяются для повышения пропускной способности радиолиний, с учетом особенностей спутниковых систем ДЗЗ.

В настоящее время выделяют несколько основных направлений, обеспечивающих повышение пропускной способности спутниковых радиолиний, применимых для систем ДЗЗ [6]:

- применение многоуровневой модуляции и высокоэффективного помехоустойчивого кодирования;
- обеспечение режима адаптивной модуляции и кодирования;
- сжатие заголовков пакетов сетевого и транспортного уровней;
- совмещение используемых частотных диапазонов;
- мультипротокольная инкапсуляция.

Помимо вышеперечисленных методов, в основе которых лежит либо расширение используемой полосы частот, либо повышение эффективности использования частотного ресурса, выигрыша по пропускной способности можно добиться за счет повышения энергетики радиолинии, однако это неизбежно приводит к возрастанию массогабаритных характеристик и стоимости бортовой аппаратуры спутников ДЗЗ и ограничено международными регламентирующими документами. Наибольшее повышение пропускной способности спутниковых

радиолиний, таким образом, может быть достигнуто за счет совместного применения всех указанных методов, подходов и средств.

Обзор существующих спутниковых радиолиний систем ДЗЗ

Одной из современных тенденций в области ДЗЗ является выпуск большого количества узкоспециализированных систем на базе малых космических аппаратов (МКА), оснащенных высокодетальной аппаратурой. Такие спутники ДЗЗ обеспечивают достаточно высокое пространственное разрешение, обладая при этом пониженными требованиями к скоростям передачи информации в связи с меньшим количеством бортовой аппаратуры. В S- и X-диапазонах рабочих частот такие спутники могут иметь пропускную способность радиолинии «Космос – Земля» до 120 Мбит/с [7-9]. Несмотря на то, что данное значение само по себе сравнительно невелико, можно утверждать, что развитие сетевой инфраструктуры низкоорбитальных космических систем ДЗЗ способствует повышению оперативности передачи информации к потребителю.

Тем не менее, главным лимитирующим фактором, ограничивающим в пропускной способности систем и сетей ДЗЗ в целом, остается пропускная способность каждого отдельного радиоканала «Космос-Земля». Для оценки текущего состояния спутниковых радиоканалов в таблице 1 приведены параметры находящихся в эксплуатации и планируемых к запуску КА ДЗЗ с наилучшими с точки зрения скорости передачи информации параметрами передающей аппаратуры.

Таблица 1

Характеристики спутников ДЗЗ, использующих для передачи целевой информации X-диапазон частот [3]

Название КА	Страна, год запуска	Высота орбиты, км	Макс. скорость, Мбит/с
WorldView 2	США 2009	770	800
Pleiades	Франция 2011	705	465
KOMPSAT-3	Корея 2012	685	600
Канопус-В	Россия 2012	510	300
KOMPSAT-5	Корея 2013	550	300
Кондор-Э	Россия 2013	500	350
Ресурс-П	Россия 2013	475	300
Метеор-М №2	Россия 2014	825	245
WorldView-3	США 2014	617	1200
KazEOSat-2	Казахстан 2014	630	160
KazEOSat-1	Казахстан 2014	750	270
EgyptSat-2	Египет 2014	660	600
Deimos-2	Южная Корея, Испания 2014	600	160
SPOT-7	Франция 2014	695	300
Landsat-8	США 2014	705	440
Gaofen-2	Китай 2014	631	2x450
Sentinel-2	ЕС 2015	786	2x280
ALOS-2	Япония 2014	628	800
ASNARO	Япония	504	800

Название КА	Страна, год запуска	Высота орбиты, км	Макс. скорость, Мбит/с
	2014		
Hodoyoshi-3,4	Япония 2014	630	540
PAZ SAR	Испания 2015	514	300
TeLEOS-1	Сингапур 2015	550	300
DMC-3	Великобритания 2015	650	320
NovaSAR-S	Великобритания 2015	580	500
KOMPSAT-3A	Корея 2015	528	1000
CSG	Италия 2015	619,6	2x260
EnMAP	Германия 2015	643	320
Ресурс-П 3	Россия 2016	475	300
WorldView-4	США 2016	617	800
TechDemoSat-1	Великобритания 2016	635	400
PAZ	Испания 2016	514	300
EROS-C	Израиль ожидается в 2019	510	455

Согласно приведенным в таблице 1 данным, отечественные системы ДЗЗ несколько отстают от зарубежных аналогов в плане подсистем передачи информации. К лидерам в области обеспечения высокой пропускной способности спутникового радиоканала можно отнести США (WorldView), Китай (Gaofen-2), Японию (ASNARO) и Корею (KOMPSAT-3A). При этом нетрудно заметить, что уже в радиоканале «Космос – Земля» КА Ikonos-2, введенного в эксплуатацию в 1999 году, пропускная способность составляла 320 Мбит/с, что не отличается от

средних значений для многих современных спутников. Данная величина пропускной способности соответствует наиболее распространенной четырехуровневой модуляции, обладающей достаточно высокой помехоустойчивостью. Символьная скорость, таким образом, составляет 150-160 Мбит/с в полосе 375 МГц.

В таблице 2 приведены соответствующие величины для спутников серии WorldView компании DigitalGlobe, обеспечивающих наибольшую пропускную способность.

Таблица 2

Максимальная скорость передачи в канале Космос – Земля для спутников ДЗЗ DigitalGlobe [10]

WorldView-1	GeoEye-1	WorldView-2	WorldView-3	WorldView-4
800 Мбит/с	740 Мбит/с	800 Мбит/с	800 Мбит/с или 1200 Мбит/с	800 Мбит/с

Нетрудно заметить, что последний спутник серии, запуск которого состоялся в ноябре 2016 года, обладает той же пропускной способностью, что и первый, запущенный в 2007 году, при этом заявленная пропускная способность радиолинии спутника WorldView-4 ниже, чем у предшествующего ему WorldView-3. Данные системы используют поляризационную развязку каналов, и для скорости передачи в радиолинии, равной 800 Мбит/с, скорость передачи в одном канале равна 400 Мбит/с. На примере данной серии спутников ДЗЗ можно сделать косвенные выводы о том, что традиционные технические решения в области повышения

пропускной способности спутниковых систем передачи данных использованы настолько, что возможности X-диапазона рабочих частот практически исчерпаны.

В таблице 3 представлены параметры СКК спутников ДЗЗ, работающих в X-диапазоне.

Таблица 3

Методы модуляции и помехоустойчивого кодирования (ПК), применяемые передатчиках обратных каналов современных спутников ДЗЗ, использующих X-диапазон

Фирма/ модель	Модуляция	Кодирование	Примечания	Применение
SSTL XT _x -400 [11]	BPSK/QPSK/8-PSK-TCM	сверточный код 2/3 или 5/6 TCM R = 1/2, k = 7	от 10 до 500 Мбит/с Virtex-5 FPGA	KazEOSat-2, NovaSAR-S
Space Micro, μ XTX-100 [12]	QPSK, OQPSK, 8QPSK	7/8 LDPC или PC	до 50 Мбит/с	NASA IRIS
ThalesAlenia [13]	8PSK-TCM	сверточный код 3/4 в составе решетчатого кодирования + RS (255,239,17)	скорость до 155 Мбит/с в одном канале, при сопряжении 3 каналов – до 465 Мбит/с, 4 каналов – до 622 Мбит/с	Pleadis-1/2
General Dynamics, HRT 440 [14]	SQPSK	CCSDS (8160,7136) LDPC + PC (4088,3360) LDPC или (255/223) PC или сверточный код 1/2	384 Мбит/с с LDPC кодированием, до 440 Мбит/с без LDPC кодирования	н/д
Syrlinks EWC27 [15]	OQPSK	сверточный код 1/2, k = 7, генераторные многочлены 171 и 133	до 100 Мбит/с	GOMX-3
н/д	QPSK	CCSDS	160 Мбит/с	Deimos-2
L3CE T-722	OQPSK	RS (255,239,17)	поляризационная развязка двух передатчиков, Робщ=2·400 Мбит/с = 800 Мбит/с	Worldview-1/2
Digital Globe [16]	8-PSK	PC(255,239,17)	поляризационная развязка от 800 Мбит/с до 1200 Мбит/с	WorldView-3

Таким образом, можно заключить, что X-диапазон позволяет обеспечить скорости передачи информации в спутниковой радиолинии от 10 Мбит/с до 1000 Мбит/с; большинство имеющихся передатчиков используют многоканальную передачу и регламентированные CCSDS СКК.

Кроме того, в спутниковых системах связи, информация о которых доступна в открытых источниках, чаще всего используется набор различных скоростей передачи информации, зависящих от энергетических параметров канала. Такие системы требуют наличия усложненного канала управления «Земля – Космос» для адаптивного согласования параметров спутникового передатчика и приемника земной станции. Максимальная пропускная способность, таким образом, может значительно отличаться от средней скорости. Для сравнения в таблице 4 представлены параметры СКК спутников ДЗЗ, работающих в К-диапазоне частот. Как следует из таблицы 4, данный диапазон подразумевает широкий спектр используемых сигнальных конструкций и соответственных значений пропускной способности, однако имеются трудности по части элементной базы, в результате чего четырехкратного выигрыша в сравнении с Х-диапазоном в общем случае не достигается.

Таблица 4

Методы модуляции и помехоустойчивого кодирования (ПК), применяемые в передатчиках обратных каналов современных спутников ДЗЗ, использующих К-диапазон

Фирма/ модель	Модуляция	Кодирование	Примечания	Применение
Space Micro, µKaTx-300 [17]	QPSK, OQPSK, 8APSK (16APSK & 32QAM Optional)	LDPC 7/8, PC	от 100 кбит/с до 4 Гбит/с	н/д
HARRIS APPSTAR [18]	OQPSK	сверточный код, $R =$ $\frac{1}{2}$, $k=7$	до 100 Мбит/с	н/д
н/д [19]	16 APSK/16 QAM- OFDM	LDPC	до 3,2 Гбит/с в 16 каналах	WINDS (Китай)

Рекомендации по повышению пропускной способности радиолиний систем ДЗЗ

В целом можно выделить такие основные тенденции развития высокоскоростных спутниковых радиоканалов, как повышение спектральной эффективности используемых методов модуляции (ограниченное энергетикой радиоканала) и сопряжение нескольких каналов в одном или нескольких частотных диапазонах. Среди имеющихся вариантов уплотнения почти двукратный выигрыш можно получить при применении поляризационной развязки.

Для определения возможностей спутниковых передатчиков систем ДЗЗ необходимо провести энергетический расчет радиолинии «Космос-Земля» и оценить спектральную эффективность допустимых для использования СКК. Такой расчет был проведен в [4] в соответствии с [20, 21]. В таблице 5 показаны значения допустимой эффективной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) спутникового передатчика для X- и К-диапазонов рабочих частот, рассчитанные для высоты орбиты 700 км, а также максимальные общие потери при распространении в радиолинии для двух случаев расположения земной станции (угол места ЗС 5° в X-диапазоне и 10° в К-диапазоне для худшего случая и угол места ЗС 90° для лучшего случая).

Таблица 5

Максимально допустимые значения ЭИИМ и суммарные потери в радиолинии

	X-диапазон (5°)	X-диапазон (90°)	К-диапазон (10°)	К-диапазон (90°)
ЭИИМ, дБВт	38,91	37,63	56,92	54,65
$L_{\text{Общ}}$, дБ	194,44	168,97	281,06	192,86

Далее с помощью уравнения энергетического потенциала [22] определяется достижимая величина отношения сигнал/шум на входе приемного устройства в зависимости от шумовой температуры приемника и параметров используемых антенн. Расчеты показывают, что для пары зеркальных параболических антенн диаметром 0,4 м для передатчика и 9 м для приемника, худший случай для Х-диапазона обеспечивает отношение сигнал/шум не более 15 дБ, в К-диапазоне передача без использования помехоустойчивых кодов невозможна, а в лучших случаях в обоих диапазонах отношение сигнал/шум достигает 30 дБ.

Для лучших случаев, таким образом, предпочтительно использовать наиболее спектрально-эффективные сигнально-кодовые конструкции с низким пик-фактором, например, предложенные в [23], а адаптивная подстройка СКК позволит максимизировать общую пропускную способность системы связи. Для упрощения перехода в К-диапазон предлагается использование четырехканальной схемы на основе передающего устройства Х-диапазона с полосой 375 МГц, описанного в [24]. При этом разработка дополнительного аппаратного обеспечения не требуется, и увеличение пропускной способности радиолинии достигается за счет параллельной работы четырех передатчиков, отличающихся только настройкой синтезаторов частоты. Кроме того, за счет пониженных требований к фильтрации по соседним каналам в рамках одного частотного диапазона достигается дополнительное повышение пропускной способности. Так, максимально достижимая пропускная способность спутниковой радиолинии, работающей в К-диапазоне частот, составляет 1,920 Гбит/с при использовании модуляции PSK-8, что является

технически реализуемым, не требует поляризационной развязки и сравнима с устройствами, представленными в таблице 4.

Выводы

Таким образом, к основным путям решения проблемы улучшения скоростных характеристик модулей передачи информации отечественных систем КА ДЗЗ следует отнести применение сложных сигнально-кодовых конструкций в широко используемом Х-диапазоне частот, либо переход в К-диапазон. При этом можно сделать вывод, что на практике использование К-диапазона в настоящий момент не позволяет добиться требуемого выигрыша по пропускной способности. Это обусловлено в частности тем, что к передатчикам в К-диапазоне представлены более жесткие требования к исполнению бортовой и наземной аппаратуры (например, к точности изготовления зеркальной системы бортовых и наземных антенн, а также к точности их наведения), а также тем, что потери при распространении радиоволн в этом диапазоне выше.

Наиболее эффективными из методов модуляции, которые могут быть использованы с учетом энергетических ограничений, следует назвать PSK-8, а также рекомендуемый к использованию APSK-16. В зарубежных системах связи широко используется треллис-модуляция и различные виды относительной модуляции. К наиболее часто применяемым методам кодирования стоит отнести LDPC и сверточные коды.

Таким образом, в качестве основных рекомендаций к разработке аппаратуры связи для КА ДЗЗ следует указать использование сигнально-кодовых конструкций с высокой спектральной эффективностью, использование нескольких каналов и адаптивность системы связи. К перспективам развития в данной области следует также отнести разработку элементной базы в К-диапазоне частот и повышение точности наведения антенн для возможности использования поляризационной развязки.

Библиографический список

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Правительство Российской Федерации. URL: <http://government.ru>
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Минэкономразвития России. Введение 2013–03. URL: <http://government.ru>
3. Earth Observation Portal. URL: <https://eoportal.org>
4. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ технических характеристик, ограничивающих пропускную способность радиолинии Космос-Земля // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. Москва, 2014, С. 145-149.
5. Барсков А. Спутниковая связь: оптимизация на всех уровнях. URL: <http://www.osp.ru/telecom/2012/04/13014750>

6. Седунов Д.П., Привалов Д.Д. Повышение пропускной способности спутниковых радиолиний // Проблемы науки. 2016. №6 (7). С. 9-11.
7. Манаев Э.Ф. Дистанционное зондирование Земли серией космических аппаратов «Ресурс-П». Перспективы проекта // Science Time. 2015. №4 (16). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/distantcionnoe-zondirovanie-zemli-seriey-kosmicheskikh-apparatorov-resurs-p-perspektivy-proekta>
8. Филатов В.И. Широкополосная система радиосвязи повышенной скорости передачи информации // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57889>
9. Зимин И.И., Валов М.В. Разработка малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=57807>
10. The DigitalGlobe Constellation, DigitalGlobe brochure, 2016, URL: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/223/Constellation_Brochure_forWeb.pdf
11. X-Band-Transmitter. URL: <https://www.sstl.co.uk/Products/Subsystems/Communication/Receivers/Transmitter/X-Band-Transmitter>
12. μ XTx-100 X-Band Transmitter URL: <http://www.spacemicro.com/assets/datasheets/rf-and-microwave/uXTx-100.pdf>
13. 8PSK X-Band Transmitter. URL: <http://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/qpsktransmitter092012.pdf>

14. HRT440 X-Band High Rate Transmitter. [URL:
https://gdmissionsystems.com/space/space-electronics/mission-data-links/hrt440-x-band-high-rate-transmitter](https://gdmissionsystems.com/space/space-electronics/mission-data-links/hrt440-x-band-high-rate-transmitter)
15. X-band transmitter can transmit up to 13.3 GB per pass with a 5 m station, designed for LEO CubeSat & Nanosatellites. [URL:
http://www.syrlinks.com/en/products/cubesats/hdr-x-band-transmitter.html](http://www.syrlinks.com/en/products/cubesats/hdr-x-band-transmitter.html)
16. DigitalGlobe Simulates Complete Satelliteto-Ground Communications Systems. [URL:
http://www.mathworks.com/tagteam/78720_92176v00_DigitalGlobe_UserStory_final.pdf](http://www.mathworks.com/tagteam/78720_92176v00_DigitalGlobe_UserStory_final.pdf)
17. μ KaTx-300 Ka-Band Transmitter. [URL:
http://www.spacemicro.com/assets/datasheets/rf-and-microwave/uKATx-300.pdf](http://www.spacemicro.com/assets/datasheets/rf-and-microwave/uKATx-300.pdf)
18. Joseph Downey, Richard Reinhart, Tom Kacpura. Pre-flight Testing and Performance of a Ka-band Software Defined Radio. [URL:
https://spaceflight systems.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/Brfg-Pre-flight-Testing-and-Performance-of-a-Ka-band-Software-Defined-Radio_Downey_2012.pdf](https://spaceflight systems.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/Brfg-Pre-flight-Testing-and-Performance-of-a-Ka-band-Software-Defined-Radio_Downey_2012.pdf)
19. K. Suzuki, M. Yahata, M. Kato et al. 16APSK/16QAM-OFDM 3.2 Gbps RF Signal Direct-Processing Transmitter and Receiver Communication Experiments Using WINDS Satellite. IEICE Technical report SAT2016-40 (2016-10). [URL:
http://www2.nict.go.jp/spacelab/mfl/ksuzuki/SAT2015-40.pdf](http://www2.nict.go.jp/spacelab/mfl/ksuzuki/SAT2015-40.pdf)
20. Radio Regulations. Edition of 2012. URL: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>

21. Рекомендации МСЭ-R P: 531-12, 532-1, 525-2, 618-11, 676-10, 834-6, 835-5, 836-5, 837-6, 838-3, 839-4, 840-6, 1815-1. URL: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
22. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1104 с.
23. Bakhtin A., Semenova A., Solodkov A. High Data Rate Link Modulation and Coding Scheme Modeling // International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON-2016, Moscow, Russia, 12-14 May 2016, pp. 1-5.
24. Тихомиров А.В., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю., Михайлов В.Ю. Использование четырехканальной системы передачи информации для повышения пропускной способности радиолинии Космос – Земля до 2 Гбит/с // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2016. Т. 21. № 3. С. 235 - 239.