

# ТРАНСПОРТНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ TRANSPORT AND SPACE SYSTEMS

УДК 621.396:629.78

## Актуальные задачи построения систем связи для напланетных и орбитальных станций

*А.А. Бахтин, А.Г. Тимошенко, Е.О. Белоусов, К.М. Ломовская*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

## Fundamental Tasks of Communication Systems Design for on-Planet and Orbital Stations

*A.A. Bakhtin, A.G. Timoshenko, E.O. Belousov, K.M. Lomovskaya*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Рассмотрены основные этапы создания напланетных и орбитальных станций и технические требования к параметрам сети связи роботизированных комплексов. Среди существующих особенностей взаимодействия космических систем, помимо пропускной способности порядка нескольких гигабит в секунду, можно выделить требование адаптивности, высокой достоверности и надежности радиолинии. Описаны сравнительные характеристики фазовой модуляции без разрыва фазы, фазовой четырехпозиционной модуляции со сдвигом квадратур, решетчатой модуляции с применением сверточного кода 4D-8PSK-TCM. Показано, что параметры соответствующей перспективной электронно-компонентной базы на основе GaN позволяют обеспечить высокую плотность мощности, достигающую 10 Вт/мм на рабочих частотах 30–40 ГГц, для СВЧ-усилителей мощности, а реализация АЦП по 0,18-мкм и 0,09-мкм КМДП-технологиям позволяет достигнуть быстродействия до 3,5 млрд выборок/с для программно-определяемого радиомодема.

*Ключевые слова:* сверхвысокоскоростные космические радиолинии; дистанционное зондирование Земли; математическая модель радиоэфира; синхронизация; системы связи; системы управления; СВЧ-транзисторы.

The main stages of creating the on-planet and orbital stations and the technical requirements to parameters of the robotic complexes communication network have been considered. Among the existing features of interaction of space systems, in addition to the capacity of the several Gb/s order, the requirement of adaptability, high robustness and reliability of the radio link can be distinguished. The comparative characteristics of phase modulation without phase break, of the phase four-position modulation with the shift of quadratures, array

modulation with the application of the convolution code 4D-8PSK-TCM have been described. It has been shown that the parameters of the corresponding perspective electron-component base, which is based on GaN, permit to provide the power high density achieving 10 W/mm at the operating frequencies 30-40 GHz, for microwave power amplifiers, and the ADC implementation by 0.18  $\mu\text{m}$  and 0.09  $\mu\text{m}$  CMOS technologies allows achieving the speed of up to 3.5 Gsamples/s for software defined radio modem.

*Keywords:* ultra high speed space-to-Earth radio communication link, Earth's remote sensing (ERS), mathematical model of radio link; synchronization; control systems; microwave transistors.

**Введение.** В ближайшие десять-пятнадцать лет можно ожидать начала колонизации планет. Планируется построить напланетные станции на Марсе и Луне [1, 2]. Освоение космических объектов немислимо без роботизированных средств, способных выполнять рутинные задачи станции. Такие роботизированные средства будут создаваться поэтапно.

1. Один напланетный робот для сбора общей информации о планете. Такие роботы являются либо неподвижными и полностью автоматическими, либо полностью управляемыми человеком с частичной автономностью, достаточной для решения задач на время перехода сигналов по космическому пространству.

2. Один либо несколько роботов, работающих автономно и управляемых человеком из наземного пункта в случае исключительных ситуаций.

3. Несколько роботов в единой сети, выполняющих общую задачу (прежде всего, это подготовка будущего места обитаемой напланетной базы) и управляемых человеком из орбитального модуля на орбите планеты или из наземного пункта в случае необходимости.

4. Несколько автономных роботов, обслуживающих напланетную базу с работающими на ней космонавтами.

Большинство стран считает важным выполнение первого этапа до конца 2025 г. [3], хотя существуют амбициозные проекты решения второго и третьего этапов до 2030 г. С учетом возможных задержек информационных сигналов между Землей и Марсом, которые варьируются в пределах от 10 до 45 мин в зависимости от взаимного положения Земли и Марса, взаимодействие с орбитальным комплексом, в том числе прямое управление с Земли, невозможно. Поэтому переход между этапами потребует наделения космических роботизированных систем различными уровнями автономности. Уровень автономности роботов может варьироваться в зависимости от алгоритмов, сложности задачи и вычислительной мощности. При этом перспективным является подход группового, или роевого, интеллекта, когда группа роботов, получив задание, по ситуации распределяет задачи и нагрузку, работая как единый объект. С одной стороны, подход требует наличия мощного бортового вычислителя и надежной связи между роботами этого «роя» для передачи команд и данных. С другой стороны, значительно увеличивается надежность системы, снижается частота вызовов оператора, уменьшаются требования к пропускной способности магистральных линий связи. Решение задачи взаимодействия группы роботов определяется каналом связи и сетевой инфраструктурой, в том числе протоколами передачи данных, доступными роботизированным комплексам станции.

**Особенности взаимодействия космических систем для напланетных и орбитальных станций.** По рекомендациям Международного консультативного комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) проводится адаптация наземных сетей и систем связи для космических применений. При этом точные значения скорости передачи данных зависят от разработчиков систем связи. В настоящее время основным протоколом передачи данных между напланетными объектами и наземным пунктом управления и контроля является протокол обмена данными Proximity-1, включающий как межпланетную связь, так и связь между спутником-ретранслятором и напланетными объектами [4–6]. Так, система передачи данных на наземную станцию с поверхности Марса [7–11] имеет три канала связи с Землей. При этом скорость передачи информации не превышает 1 Мбит/с для связи между марсоходом «Curiosity» и аппаратом «Mars Reconnaissance Orbiter» и 6 Мбит/с для связи с Землей. В планах NASA к 2025 г. реализовать радиолинию со скоростью до 30 Мбит/с с поверхности Марса до его спутников в *Ka*-диапазоне [12]. Однако с учетом существующих планов размещения спутников на стационарной орбите Марса можно рассматривать высокоскоростную радиолинию с пропускной способностью 6–10 Мбит/с и низкоскоростную линию связи со скоростью 128 кбит/с. Команды управления и группового взаимодействия совместно с полезными данными должны передаваться со скоростями до нескольких гигабит в секунду. Кроме того, для передачи целевой информации от спутниковых систем, например систем дистанционного зондирования Земли, уже сейчас требуются научно-технические решения, позволяющие обеспечить скорость передачи информации по радиолинии «космос–Земля» до 2 Гбит/с с учетом длительности сеанса связи около 10 мин.

При построении канала связи и управления роботизированными комплексами для обеспечения непрерывной работы без присутствия человека в изменяющейся обстановке со сложными рельефами должен быть соблюден принцип адаптивности радиолинии. Основным критерием, определяющим необходимость применения принципа адаптивности, является обеспечение устойчивости радиосвязи в процессе эксплуатации радиолинии связи и управления робототехническими средствами. Передача данных должна происходить с высокой достоверностью и надежностью передачи сообщений, для чего используется кодирование передаваемых сообщений с обнаружением ошибок информационных бит при приеме. Применение классических помехоустойчивых кодов с исправлением ошибок не гарантирует предотвращения появления ложных и трансформированных сообщений. На сегодняшний день не разработаны коды, обеспечивающие предельные характеристики канала связи, такие как скорость и помехоустойчивость. Подходящими считаются коды, позволяющие асимптотически достичь предела Шеннона. Для этого необходимо использовать троичные коды [13].

Достоверность передачи данных определяется отличиями принятого сигнала от отправленного. Такие отличия возникают вследствие действия помех или искажений в эфире или в трактах приемника и передатчика. Требования по качеству для систем связи не поддаются прямому подсчету, поскольку на сигнал в процессе распространения влияет множество различных факторов, которые изначально неизвестны, – это замирание сигнала, затухание и зашумление сигнала на неизвестную заранее величину, переменное влияние атмосферы и др. При разработке требований к времени распространения сигнала необходимо учитывать длительность распространения сигнала до Земли, которая намного превышает время задержки, указанное в таких стандартах Международного союза электросвязи, как ITU-T Y.1543 [14]. Требования по показателям качества для видеопотока также носят субъективный характер и оцениваются приблизи-

тельно. Методы оценки качества видеопотока изложены в рекомендации ITU-R BT.500 [15]. Состояние канала связи при вероятности ошибки  $p > 10^{-3}$  называется прерыванием канала связи и относится к кратковременным прерываниям, длительность которых не превышает 10 с. Для этих же телекоммуникационных каналов готовность канала связи должна быть не менее 0,99–0,995.

Нормы на неготовность радиотракта, обусловленную характеристиками оборудования и условиями распространения, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.579. В качестве показателя неготовности цифрового тракта из-за неготовности оборудования предложено временно использовать значение 0,2% в год, тогда как для неготовности из-за условий распространения – 0,2% наихудшего месяца.

**Методы достижения высоких скоростей и высокой надежности передачи данных.** В настоящее время основными системами, эксплуатирующими высокоскоростные каналы «спутник–Земля» являются системы дистанционного зондирования Земли и спутники-агрегаторы информационных потоков от сторонних малых спутников. Передача фотографий высокого разрешения (до 0,3 м), а также возможность приема информации ограниченным числом наземных станций приводят к запросам на увеличение скорости в канале «космос–Земля» более 1 Гбит/с в X- либо Ka-диапазоне. На сегодняшний день скорость передачи информации по радиолиниям X-диапазона частот равна 300 Мбит/с. Скорость передачи данных при сохранении требуемой вероятности ошибки на бит может быть повышена за счет увеличения энергетики радиолинии или построения приемопередающей аппаратуры с лучшими характеристиками, к которым относятся добротность приемной системы, зависящая от шумовой температуры и коэффициента усиления антенны, и потери, связанные с наведением антенн, распространением в антенно-фидерном тракте и обработкой в модеме.

Согласно рекомендации Комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS 413.0-G-2) [16] от октября 2009 г., в X-диапазоне (полоса частот 8025–8400 МГц) предлагается использовать следующие методы модуляции: фазовая модуляция без разрыва фазы GMSK с параметром фильтра обкатки  $\alpha = 0,25$ ; фазовая четырехпозиционная модуляция со сдвигом квадратур OQPSK; решетчатая модуляция с применением сверточного кода 4D-8PSK-TCM. Модуляция OQPSK из-за спектральной эффективности не более 4 бит/(с·Гц) при выбранной полосе частоты (X-диапазон) не достигает скорости 1 Гбит/с даже без помехоустойчивого кодирования. Модуляция 4D-8PSK-TCM за счет сверточного декодера и максимального разнесения используемых последовательно точек созвездия модуляции дает выигрыш от кодирования в пределах 3–6 дБ и до 10 дБ при использовании нескольких антенн, а также обеспечивает верный прием при инверсии несущей. В таблице приведены энергетические и спектральные характеристики рекомендуемой к использованию сигнально-кодовой конструкции на базе решетчатого кода, дополненного одноудлинненным кодом Рида–Соломона и перемежителем с глубиной  $k = 5$ .

**Характеристики 4D-8PSK-TCM + RS(256,239,18)**

Относительная скорость	Спектральная эффективность, бит/(с·Гц)	$E_b/N_0$ , дБ, для BER= $10^{-9}$ (теоретическое/практическое)
8/9	3,74	5,2/6,3 [17]
10/11	4,68	6,2/8,65 [18]

Помимо фазовых модуляций допускается использование амплитудно-фазовых методов, например конструкции стандарта DVB-S2 [19], позволяющие достичь спек-

тральной эффективности до 8,32 бит/(с·Гц) и соотношения  $E_b/N_0$  для BER =  $10^{-7}$  до 15,90 дБ. Система модуляции ФМ16+АИМ, использующая в синфазной ветви передатчика многопозиционную фазовую модуляцию, а в квадратурной – амплитудную для обеспечения требуемой спектральной эффективности, в трех возможных вариантах исполнения позволяет получить спектральную эффективность  $\gamma = 11,44$  бит/(с·Гц) при  $E_b/N_0 = 24,93$  дБ,  $\gamma = 11,0$  бит/(с·Гц) при  $E_b/N_0 = 28,47$  дБ или  $\gamma = 10,0$  бит/(с·Гц) при  $E_b/N_0 = 22,74$  дБ при потерях на демодуляцию 1,09 дБ, 5,77 дБ и 2,64 дБ соответственно.

Для достижения битовой скорости  $R = 2000$  Мбит/с при полосе не более 375 МГц в X-диапазоне требуется спектральная эффективность используемой сигнально-кодовой конструкции не менее 10,6 бит/с·Гц по отношению к итоговой полосе радиосигнала. Таким требованиям не удовлетворяют широко используемые в передовых зарубежных образцах типы модуляции, а модуляции более высоких порядков, такие как 64QAM либо 64APSK, неприемлемы из-за значительного диапазона вариаций амплитуды комплексной огибающей. Поэтому требуется либо переходить в Ka-диапазон ввиду значительно большей доступности этой полосы частоты, либо использовать метод модуляции ФМ16+АИМ, поскольку для этого метода вариация амплитуды имеет значение около 1% от общей амплитуды огибающей.

Дальнейшее повышение скорости передачи информации возможно за счет адаптивных модемов, в которых при уменьшении дальности связи при полете космического аппарата адаптивно увеличивается скорость передачи информации. При движении космического аппарата от края зоны видимости к ее центру дальность связи от максимальной величины  $d$  может измениться до величины высоты орбиты  $H$  в надире, что приведет к увеличению энергетического потенциала за счет уменьшения потерь сигнала при его распространении и уменьшения шумовой температуры приемной системы. Эта особенность может быть использована для увеличения скорости передачи информации путем перехода к созвездиям сигнальных точек с большим числом. Например, на краю зоны видимости космического аппарата возможно использование модуляции ФМ4, обеспечивающей скорость передачи данных  $R = 2R_0$  при требуемом отношении сигнал/шум  $h^2 = 10,3$  дБ. В надире может применяться модуляция КАМ-64 со скоростью  $6R_0$  с  $h^2 = 19$  дБ, что требует увеличения энергетики радиолинии на 8,7 дБ. При этом средняя скорость передачи информации  $R = \frac{6R_0 + 2R_0}{2} = 4R_0$ , что в два раза больше скорости передачи данных на краю зоны видимости космического аппарата.

**Обеспечение скорости и надежности передачи данных с учетом новейших конструкторско-технологических решений.** В настоящее время в МИЭТ разрабатываются конструкторско-технологические решения для создания электронно-компонентной базы (ЭКБ) на основе нитрида галлия GaN для современной радиоэлектронной аппаратуры в СВЧ-диапазоне. Использование GaN и гетероструктур на его основе позволяет производить приборы, которые работают в широком диапазоне температур и имеют высокую плотность мощности, достигающую 10 Вт/мм на рабочих частотах 30–40 ГГц. Следовательно, транзисторы на GaN можно применять для разработки и производства СВЧ-усилителей мощности. Транзисторы на основе GaN также имеют высокую подвижность носителей заряда, поэтому применяются в приборах радиоэлектроники, например малошумящих усилителях, фазовращателях, коммутаторах и смесителях. Таким образом, ЭКБ на основе GaN позволяет реализовать все функциональные блоки СВЧ-части приемопередатчика, а широкая полоса рабочих частот, характерная для данной ЭКБ, дает возможность достичь высоких скоростей передачи данных. Следует отметить, что функциональные блоки на базе GaN выполняются, как правило, в виде

отдельных малых ИС. Изготовление цифровых схем и сложнофункциональных схем приемопередатчиков, включающих цифровые блоки, по данной технологии нецелесообразно.

Обеспечение высоких скоростей передачи данных достигается за счет перераспределения спектра с учетом возможностей технологии программно-определяемого радио (Software-defined radio, SDR), которая подразумевает замену части аналоговых компонентов, таких как смесители, фильтры, усилители, детекторы, на цифровую обработку. Входящий полезный сигнал при использовании такой технологии поступает непосредственно на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) или предшествующий ему предварительный усилитель. Для реализации систем с использованием технологии SDR можно применять КМДП-технологии, которая позволяет создавать системы на кристалле со множеством сложных цифровых блоков. Скорость передачи данных в системах, использующих технологию SDR, определяется возможностями схем аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей (ЦАП), а также быстродействием цифровых блоков, которое увеличивается с уменьшением проектных норм. Разработка кремниевых КМДП-устройств в настоящее время ведется в дизайн-центре в МИЭТ на кафедре телекоммуникационных систем, а также в дизайн-центрах г. Москвы, г. Зеленограда и других регионов страны. Производство кремниевых КМДП интегральных схем осуществляется на предприятиях г. Зеленограда (например, «НИИМЭ и Микрон»). На сегодняшний день широко освоено производство микросхем с проектными нормами 0,18 мкм. Кроме того, осваивается технологический процесс с проектными нормами 0,09 мкм, что, в частности, позволяет проектировать АЦП с быстродействием до 3,5 млрд выборок в секунду [20].

Для разработки и изготовления более быстродействующих устройств возможно использование зарубежных фабрик-изготовителей ИМС, таких как UMC, TSMC или INR. TSMC предоставляет возможность изготовления микросхем с проектными нормами до 40 нм, граничная частота транзистора составляет  $\approx 400$  ГГц, UMC – до 65 нм, граничная частота транзистора  $\approx 360$  ГГц. Разработка схем смешанного сигнала (АЦП/ЦАП) при использовании данных технологий является сложной задачей, поскольку с уменьшением технологических норм ниже 100 нм транзисторы имеют очень маленький собственный коэффициент усиления, что может привести к малой эффективной разрядности АЦП/ЦАП. Применение глубоко субмикронных технологий позволяет разрабатывать более быстродействующие цифровые блоки и блоки смешанного сигнала с частотой до 20 млрд выборок в секунду [21], что делает возможным реализацию широкополосных систем связи на основе технологии SDR с более широкой полосой.

Также для достижения высокой скорости передачи данных применяются транзисторы с высокой подвижностью электронов. Одна из наиболее перспективных технологий, использующих транзисторы с высокой подвижностью электронов, – SiGe-БиКМОП-технология. Ее преимущества заключаются в высокой граничной частоте транзисторов при сравнительно больших технологических нормах. Например, биполярный транзистор на основе гетероструктур, выполненный по SiGe-БиКМОП-технологии 0,13 мкм, имеет граничную частоту примерно 300 ГГц, что сравнимо с КМДП-транзисторами с длиной затвора 65 нм. При этом SiGe-транзисторы имеют заметно больший собственный коэффициент усиления, что упрощает проектирование устройств смешанного сигнала. БиКМОП-технология процесс подразумевает расположение КМДП- и биполярных устройств на одном кристалле. Это позволяет проектировать высокопроизводительные аналоговые устройства и быстродействующие цифровые блоки на одной микросхеме. Таким образом возможна реализация как широкополосных

SDR-систем, так и традиционных приемопередающих устройств. Производство микросхем по SiGe-БиКМОП-технологии с проектными нормами 0,25 мкм в России осуществляется на базе «НИИМЭ и Микрон». Зарубежные производители, такие как ИНР, изготавливают микросхемы по БиКМОП-технологии с проектными нормами до 0,13 мкм.

**Заключение.** Активное изучение космического пространства обусловило возникновение в ближайшее время обитаемых напланетных и дальних орбитальных станций, что не представляется возможным без использования принципов автоматического управления, роботизации и выполнения ряда задач без участия человека, что требует увеличения пропускной способности сети роботизированных комплексов для напланетных и орбитальных станций.

Перед разработчиками систем связи ставится задача повышения пропускной способности спутниковых радиолиний для систем передачи целевой информации, где уже сейчас требуются научно-технические решения, позволяющие обеспечить скорости передачи информации по радиолинии «космос – Земля» до 2 Гбит/с. Одной из ключевых потребностей для достижения заявленных характеристик скорости передачи данных является перспективная элементная база, способная поддерживать работоспособность в жестких условиях космоса. Эти результаты могут быть достигнуты с использованием приборов на широкозонных полупроводниках (карбид кремния, нитрид галлия, нитрид алюминия и др.). Так, элементы на основе GaN с шириной запрещенной зоны 3,5 эВ могут сохранять работоспособность при температурах до 500 °С, обладая при этом подвижностью, достаточной для создания высокоскоростных приемопередающих модулей.

### Литература

1. Vision and voyages for planetary science in the decade 2013-2022 // Space Studies Board, National Research Council, National Academies Press, 2012. – URL: [https://solarsystem.nasa.gov/multimedia/downloads/Vision\\_and\\_Voyages-FINAL1.pdf](https://solarsystem.nasa.gov/multimedia/downloads/Vision_and_Voyages-FINAL1.pdf) (дата обращения: 26.08.2015).
2. Основные положения основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утвержденные Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. № Пр-906. – URL: [http://www.federalspace.ru/media/files/docs/3/osnovi\\_do\\_2030.doc](http://www.federalspace.ru/media/files/docs/3/osnovi_do_2030.doc) (дата обращения: 26.08.2015).
3. The rationale for a long-lived geophysical network mission to Mars / **W.B. Banerdt, R. Grimm, F. Montmessin et al.** // White Paper for the NRC Planetary Science Decadal Survey. – 2009. – URL: <https://archive.org/download/longlivedgeophysicalnetworkmissiontomars/WilliamBBanerdt.doc> (дата обращения: 26.08.2015).
4. Proximity-1 space link protocol—physical layer// The Consultative Committee for Space Data Systems. – URL: <http://public.ccsds.org/publications/archive/211x1b4.pdf> (дата обращения: 22.06.2015).
5. Proximity-1 space link protocol —data link layer// The Consultative Committee for Space Data Systems. – URL: <http://public.ccsds.org/publications/archive/211x0b5.pdf> (дата обращения: 22.06.2015).
6. Proximity-1 space link protocol —coding and synchronization sublayer// The Consultative Committee for Space Data Systems. – URL: <http://public.ccsds.org/publications/archive/211x2b2.pdf> (дата обращения: 22.06.2015).
7. Proximity-1 space link protocol – rationale, architecture, and scenarios// The Consultative Committee for Space Data Systems. – URL: <http://cwe.ccsds.org/fm/blog/Lists/Posts/Post.aspx?ID=59> (дата обращения: 22.06.2015).
8. **Makovsky A., Plott P., Taylor J.** Mars science laboratory telecommunications system design // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. – 2009. – URL: [http://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso14\\_MSL\\_Telecom.pdf](http://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso14_MSL_Telecom.pdf) (дата обращения: 26.08.2015).
9. Relay support for the Mars science laboratory and the coming decade of Mars relay network evolution / **C.D. Edwards, B.W. Arnold, D.J. Bell et al.** //Aerospace Conference, 2012 IEEE // IEEE. – 2012. – P. 1–11.

10. Replenishing the Mars relay network / *C.D. Edwards, P.R. Barela, R.E. Gladden et al.* //Aerospace Conference, 2014 IEEE // IEEE. – 2014. – P. 1–13.
11. Mars network: strategies for deploying enabling telecommunications capabilities in support of Mars exploration / *C.D. Edwards, J.T. Adams, J.R. Agre et al.* //Concepts and Approaches for Mars Exploration. – 2000. – Vol. 1. – P. 105.
12. The Lunar atmosphere and dust environment explorer (LADEE) / *G.T. Delory, R. Elphic, T. Morgan et al.* //Lunar and Planetary Science Conference. – 2009. – Vol. 40. – P. 2025.
13. *В.С. Кузнецов.* Возможности асимптотического достижения границы К. Э. Шеннона// [Персональная страница В. С. Кузнецова]. – URL: <http://zelstar.comtv.ru/possibilities.pdf> (дата обращения: 22.06.2015).
14. Measurements in IP networks for inter-domain performance assessment// International Telecommunication Union. – URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1543/en> (дата обращения: 22.06.2015).
15. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures// International Telecommunication Union. – URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500/en> (дата обращения: 22.06.2015).
16. Bandwidth-efficient modulations summary of definition, implementation, and performance //Informational Report, Issue 2, CCSDS 413.0-G-2, Washington, DC, USA, Oct. 2009. – 65 p.
17. ThalesAleniaSpace, 8 PSK X band data downlink subsystem //Datasheet ThalesAleniaSpace France, March 2005, updated Sept. 2012.
18. Proceedings of the CCSDS RF and modulation subpanel 1E meeting of May 2001 concerning bandwidth-efficient modulation. Report CCSDS B20.0-Y-2, Yellow Book, Oxfordshire, U.K., June 2001. – URL: <http://ccsds.cosmos.ru/publications/archive/B20x0y2.pdf> (дата обращения: 26.08.2015).
19. A Review of spectrally efficient modulations for Earth observation data downlink / *P. Addabbo, F. Antonacchio, T. Beltramonte et al.* //2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), May, 2014. – P. 428–432.
20. A 3.5 GS/s 5-b Flash ADC in 90 nm CMOS / *S. Park, Y. Palaskas, A. Ravi et al.* //Custom Intergrated Circuits Conference (CICC), 2006. – P. 489 – 492.
21. *Ferenci D., Grozing M., Berroth M.* Design of a 3 Bit 20 GS/s ADC in 65 nm CMOS// Research in Microelectronics and Electronics, 2009. – P. 1–3.

Статья поступила  
12 мая 2015 г.

**Бахтин Александр Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем (ТКС) МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка беспроводных эпизодических систем связи гражданского и специализированного назначения. **E-mail** [bah@miee.ru](mailto:bah@miee.ru)

**Тимошенко Александр Геннадиевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры ТКС МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование радиочастотных СБИС и СБИС смешанного сигнала для телекоммуникаций, схемотехника аналоговых и радиочастотных устройств, сложнофункциональные блоки и модели элементов и устройств телекоммуникации, функциональная электроника и новые материалы в микроэлектронике.

**Белосов Егор Олегович** – ассистент кафедры ТКС МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование радиочастотных СБИС и СБИС смешанного сигнала для телекоммуникаций, схемотехника аналоговых и радиочастотных устройств, СВЧ-устройства.

**Ломовская Ксения Михайловна** – старший преподаватель кафедры ТКС МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование радиочастотных СБИС и СБИС смешанного сигнала для телекоммуникаций, схемотехника аналоговых и радиочастотных устройств, сложнофункциональные блоки и модели элементов и устройств телекоммуникации.