

Отечественные модемы земных станций спутниковой связи

А. С. Белов, ведущий научный сотрудник ФГУП НИИР, к. т. н.; beloff@niir.ru

А. И. Алдошин, начальник лаборатории ФГУП НИИР; aldoshin@niir.ru

А. Ю. Абакумова, ведущий инженер ФГУП НИИР; abakumova@niir.ru

УДК 621.391

DOI: 10.34832/ELSV.2020.2.1.004

Аннотация. Представлен обзор российского рынка модемов отечественного производства для земных станций спутниковой связи (ЗССС). Анализируется повышение роли модемов для ЗССС в процессе их развития. Рассмотрены функции и характеристики спутниковых модемов в современных ЗССС, в том числе имеющих официальный статус телеком-оборудования российского происхождения (ТОРП), что является необходимым условием импортозамещения. Проведено сравнение отечественных спутниковых модемов с лучшими зарубежными образцами. Обозначены тенденции развития спутниковых модемов на среднесрочную перспективу.

Ключевые слова: спутниковый модем, модуляция, кодирование, вероятность ошибки.

ВВЕДЕНИЕ

Модемы во многом определяют технические и экономические характеристики земных станций спутниковой связи. До недавнего времени в отечественных ЗССС широко применялись модемы производства ведущих зарубежных радиоэлектронных фирм. Это было вызвано тем, что в 1980–90-е гг. российские предприятия – производители средств связи не могли выпускать современную конкурентоспособную продукцию.

Однако после ввода санкций на поставку в РФ высокотехнологичного радиоэлектронного оборудования (РЭО) на государственном уровне был принят курс на импортозамещение высококачественных комплектующих ЗССС, в том числе модемов.

В последнее время ситуация с производством отечественных радиоэлектронных средств (РЭС) улучшилась, но в открытой литературе информации о выпускаемых в России спутниковых модемах недостаточно. Это весьма затрудняет технически и экономически обоснованный подбор необходимого оборудования. Опубликованные ранее обзоры рынка спутниковых модемов в России [1–3] не отражают современного состояния рынка. Данная статья должна восполнить эти пробелы.

ЭВОЛЮЦИЯ РОЛИ СПУТНИКОВЫХ МОДЕМОВ

За время существования спутниковой связи модемы ЗССС прошли длинный путь эволюционного развития по расширению выполняемых функций – от простейших блоков модуляции/демодуляции до сложнейших многофункциональных устройств, являющихся интеллектуальным «сердцем» станции.

Можно выделить следующие этапы развития модемов ЗССС:

1965–1970 гг. – аналоговые модуляторы/демодуляторы [4];

1970–1973 гг. – цифровые модуляторы/демодулято-

ры. Организация множественного доступа с частотным разделением (МДЧР, FDMA) [5, 6];

1973–1975 гг. – использование множественного доступа с разделением по времени (МДВР, TDMA) и с кодовым разделением (МДКР, CDMA). Сетевая синхронизация [7, 8];

1975–1978 гг. – применение блочного и сверточного помехоустойчивого кодирования. Использование кодов BCH, RS, декодирование VIT и др. Предоставление каналов по требованию, случайный доступ [9, 10];

1978–1990 гг. – использование новых эффективных видов кодирования (каскадные коды) и многопозиционной модуляции. Комбинированные методы многоканального доступа. Контроль спутниковых каналов. Появление специализированных модемов для технологии VSAT [11, 12];

1990–2000 гг. – обеспечение работы различных типов спутниковых сетей («точка–точка», «звезда», вложенная «звезда», «каждый с каждым»). Адаптивное кодирование и модуляция (АСМ). Применение решетчатого кодирования (треллис-кодов – trellis coded modulation, TCM) и турбокодов (TCC и TPC). Использование кодов LDPC [13];

2000–2010 гг. – применение сигнально-кодовых конструкций. Появление технологии совмещения в одной полосе частот прямого и обратного спутниковых каналов (Paired Carrier Multiple Access, PCMA). Интеграция различных функций (модем + маршрутизатор). Введение стандартов спутникового вещания DVB-RCS, DVB-S и DVB-S2. Появление модемов для пакетной передачи данных (ППД) [14, 15];

2010 г. – по настоящее время – стандарт DVB-S2X. Активный переход к разработке и использованию универсальных программно-реконфигурируемых модемов радиосистем, построенных по технологии SDR [16, 17].

Основные функции спутниковых модемов в ЗССС сегодня:

- модуляция/демодуляция сигналов в спутниковых радиоприемах;
- помехоустойчивое кодирование/декодирование сигналов в спутниковых радиоприемах;
- организация многостанционного доступа ЗССС к спутниковому сегменту;
- организация различных способов предоставления каналов;
- организация совместной работы групп ЗССС в сети спутниковой связи;
- контроль состояния сформированных спутниковых каналов;
- приоритизация трафика, передаваемого в сети спутниковой связи;
- обеспечение заданного качества обслуживания (QoS).

Современные модемы являются сложными, многофункциональными, полностью цифровыми устройствами с удаленным программным управлением (рис. 1).

При проведении настоящего исследования были поставлены задачи:

- выявить основных отечественных производителей спутниковых модемов, присутствующих на

- рынке, и представить выпускаемые ими модели;
- сформулировать целевые характеристики спутниковых модемов, ради достижения которых они создаются и по значениям которых в дальнейшем будет производиться их классификация;
- рассмотреть характеристики и отличительные черты модемов гражданского и двойного назначения для всего множества выявленных отечественных производителей;
- сравнить производимые в России спутниковые модемы с лучшими зарубежными образцами;
- определить прогнозные тенденции развития спутниковых модемов на среднесрочную перспективу.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим присутствующие на открытом российском рынке спутниковые модемы для ЗССС, работающие через спутники связи с прямой ретрансляцией. Среди множества спутниковых модемов этого класса, как произведенных на отечественных предприятиях (российский десятичный номер, статус «Сделано в России»), так и импортированных из-за рубежа, подробно рассматривались серийно выпускаемые модемы гражданского и двойного назначения, которые имеются

Рисунок 1

Структура современного спутникового модема Modular Satellite Modem M7 фирмы Datum Systems (США) [18]

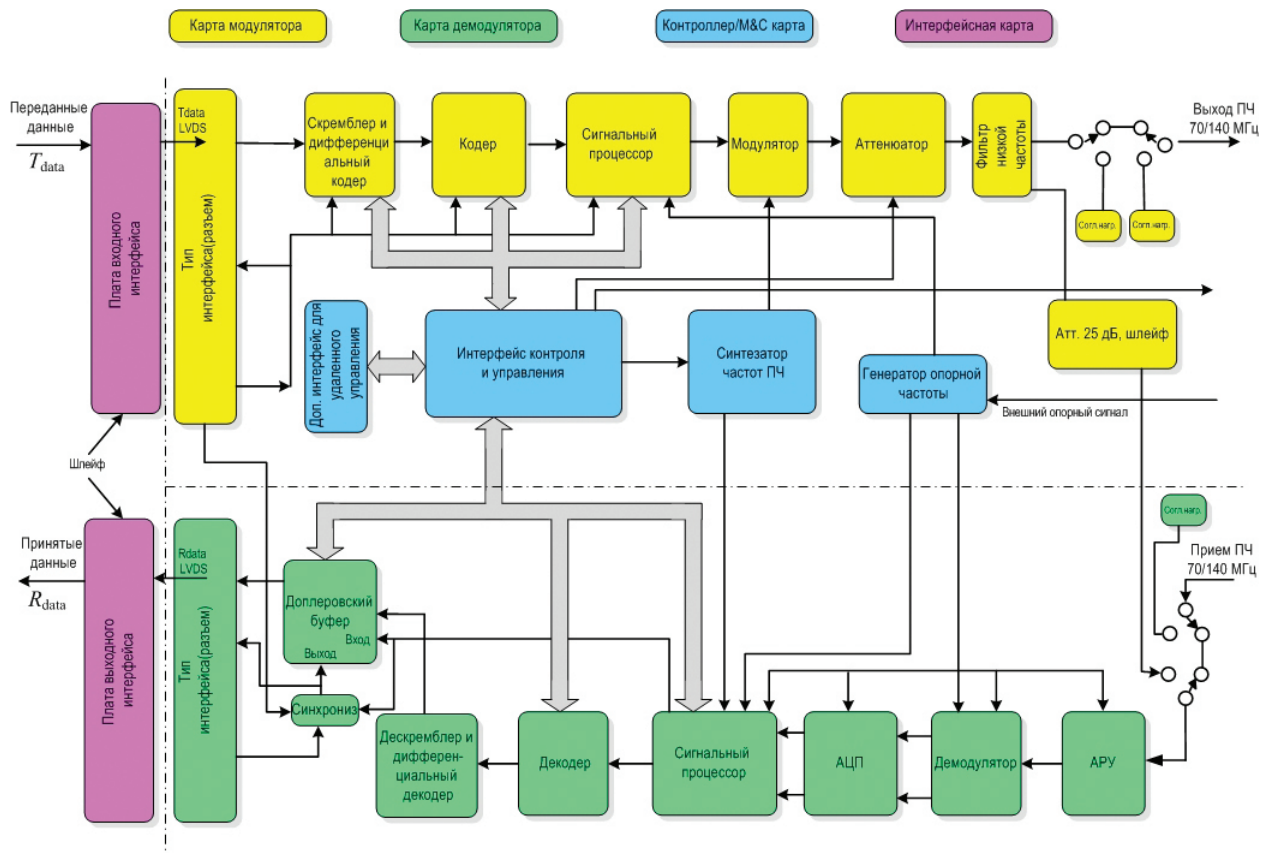


Таблица 1

Спутниковые модемы российских производителей

Наименование	Производитель	Статус	Примечание
Спутниковые маршрутизаторы UHP-1000, UHP-200 и UHP-220	ООО «ИСТАР» (Москва)	Произведено в России	Серийный выпуск. Функциональное объединение модема и маршрутизатора
Цифровой модем M-64	ФГУП НИИР – ЛОНИИР (Санкт-Петербург)	Произведено в России. Оформление статуса ТОРП	Завершена ОКР
Спутниковый модем MD100SE	ЗАО «Радиян» (Санкт-Петербург)	Произведено в России	-
Спутниковый цифровой модем CM-2.6M	ООО «Радис Лтд» (Москва, Зеленоград)	Произведено в России	-
Спутниковый модем РМД-01М	ФГУП РНИИРС (Ростов-на-Дону)	Нет данных	-
Маршрутизатор спутниковый ЯР-1040 SCPC	ООО «Феникс», Группа компаний «Искра» (Красноярск)	ТОРП	Серийный выпуск
Спутниковые цифровые модемы ЭТРА-МД4L, ЦМ-5С16L и ЭТРА-МД9L	ООО «ЭТРА-Плюс» (Москва)	Произведено в России	Серийный выпуск

в свободной продаже и информация о характеристиках которых опубликована в открытых источниках. Среди них выделяются те, которые обладают официальным статусом телекоммуникационного оборудования российского происхождения, что открывает возможность их использования для нужд государства.

Условия получения статуса ТОРП определены в постановлениях Правительства РФ от 17.07.2015. № 719, от 16.09.2016 № 925, от 26.09.2016 № 968, от 14.01.2017 № 9, в распоряжении Правительства РФ от 31.05.2019 № 8 58-р и в совместном приказе Минпромторга России и Минэкономразвития России от 17.08.2011 № 1032/397. Изделия, получившие статус ТОРП, вносятся Минпромторгом РФ в ежегодно обновляемый реестр. В соответствии с этими критериями рассмотрены спутниковые модемы, приведенные в табл. 1.

НОМЕНКЛАТУРА ХАРАКТЕРИСТИК

Поскольку современные спутниковые модемы характеризуются значительным числом показателей, а объем статьи не позволяет рассмотреть их все, ограничимся анализом только самых важных функциональных электрических характеристик модемов:

- топология спутниковой сети;
- способы многостанционного доступа (МСД);
- виды модуляции;
- диапазон символьных скоростей;
- коэффициент скругления (Roll-off);
- диапазон информационных скоростей;
- диапазон входных/выходных частот;
- способы помехоустойчивого кодирования и кодовые скорости;

Врез 1

Российские производители спутниковых модемов

<p>ООО «ИСТАР», www.eastar.ru Образовано в 2005 г., Москва</p> <p>Разработка и производство РЭО для систем спутниковой связи (ССС). Основу продуктового портфеля компании составляют спутниковые модемы различных модификаций. Разработанное компанией оборудование (центр разработок и поддержки находится в Москве) производится на заводах в России, Германии, Латвии и Канаде. Вместе с оператором спутниковой связи «Романтик» входит в международную группу UHP Networks (Канада), реализовавшую 370 сетей для заказчиков более чем в 50 странах мира</p>
<p>ФГУП НИИР–ЛОНИИР, www.loniir.ru Образовано в 1946 г. в структурах Минсвязи СССР. В настоящее время – Санкт-Петербургский филиал ФГУП НИИР</p> <p>Исследования в области спутниковой и наземной радиосвязи, радиомониторинга, спутниковой навигации, цифрового ТВ, ЭМС, цифровой обработки сигналов; разработка бортовой и наземной аппаратуры, а также ПО для цифровой обработки сигналов, АСУ спутниковой связью, САПР сетей радиосвязи и вещания, технических средств для обеспечения ЭМС; создание различной аппаратуры спутниковой связи, в том числе спутниковых модемов</p>
<p>ЗАО «РАДИАН», www.radian.spb.ru Образовано в 1990 г., Санкт-Петербург</p> <p>Разработка и производство РЭО диапазонов от 300 МГц до 90 ГГц для систем радиорелейной и спутниковой связи, в том числе спутниковых модемов. Проектные, монтажные и пуско-наладочные работы, гарантийное и послегарантийное обслуживание</p>
<p>ООО «РАДИС Лтд.», www.radis.ru Образовано в 1992 г., Москва (Зеленоград)</p> <p>Разработка и производство РЭО для систем спутниковой и радиорелейной связи: а) активного радиочастотного оборудования для ЗССС и радиорелейных станций – полупроводниковых (твердотельных) усилителей мощности (SSPA), Up-Down- и ВUC-конвертеров, маломощных усилителей (LNB) синтезаторов частот и других СВЧ-устройств; б) спутниковых модемов; устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС), специального ПО собственной разработки</p>
<p>ФГУП «РНИИРС», www.rniirs.ru Образовано в 1959 г., Ростов-на-Дону</p> <p>Разработка, производство, гарантийное обслуживание аппаратуры крупных РЭС и их составных частей гражданского и специального назначения, в том числе для ССС: крупно- и среднеапертурных антенн с диаметром зеркала до 12 м; фазированных антенных решеток; аналого-цифровых радиотрактов различных диапазонов частот; функциональных модулей ЦОС, в том числе спутниковых модемов, а также специализированных изделий аналоговой СВЧ-микроэлектроники: полупроводниковых монолитных ИС; устройств на поверхностно-акустических волнах; оптоэлектронных устройств передачи аналоговых и цифровых сигналов; многослойных СВЧ-модулей на низкотемпературной керамике; гибридных тонко- и толстопленочных ИС</p>
<p>ООО «Инжиниринговое бюро «Феникс», www.fenix24.org Образовано в 2015 г. в составе группы компаний «Искра». Оператор российской сети спутниковой связи «Стриж», Красноярск</p> <p>Разработка, производство, гарантийное обслуживание аппаратуры и систем связи гражданского и специализированного назначения, в том числе ССС. Серийное производство оборудования для стационарных и перевозимых (мобильных) станций спутниковой связи: самонаводящихся антенных систем и спутниковых модемов-маршрутизаторов</p>
<p>ООО «НПП «ЭТРА Плюс», www.etra-plus.ru Образовано в 1990 г., Москва</p> <p>Изготовление и поставка цифрового РЭО со специальным ПО: цифровых УКВ-радиостанций, коммутаторов-маршрутизаторов Ethernet, спутниковых и радиорелейных модемов, цифровых кодеков и демодуляторов, комплексов приема/передачи и обработки спутниковых метеоданных для гидрометеорологических пунктов Росгидромета</p>

- относительная нестабильность частоты выходного сигнала;
- максимально возможная полоса частот поиска входного сигнала;
- диапазон уровней входного сигнала;
- требуемое отношение сигнал/шум (E_b/N_0) на входе модема для получения заданной вероятности ошибки на выходе (при кодировании).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основные характеристики приведенных в табл. 1

Таблица 2

Характеристики отечественных спутниковых модемов (по данным производителей)

Параметры	Модемы							
	УНР 1XX (ИСТАР)	УНР 2XX (ИСТАР)	М-64 (ЛОНИИР)	MD100SE (Радисан)	СМ-2.6М (Радис Лтд.)	РМД-01М (РНИИРС)	ЯР-1040 (Феникс)	ЭТРА-МД9L (ЭТРА-Плюс)
Топология сети	Звезда, двойная звезда	Точка–точка, звезда, двойная звезда, иерархическая, полносвязная, полносвязная бесхабовая	Точка–точка	Точка–точка	Точка–точка	Точка–точка, звезда, полносвязная	Точка–точка	Звезда, точка–точка
Способы МСД	TDM/TDMA (MF TDMA)	SCPC, HUB/Rem SCPC DAMA, HUB/Rem TDM/SCPC, HUB/Rem TDM/TDMA Star/Mesh, Master/Slave Hubless MF TDMA	FDMA SCPC	FDMA SCPC	FDMA SCPC	FDMA SCPC, TDM/TDMA	FDMA SCPC	FDMA SCPC
Модуляция	На прием TDM: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK, 256APSK; на передачу TDMA: QPSK, 8PSK, 16APSK	На прием TDM: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK, 256APSK; на прием TDMA: QPSK, 8PSK, 16APSK; на передачу TDM: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK; на передачу TDMA: QPSK, 8PSK, 16APSK	BPSK, QPSK, OQPSK, 8PSK, 16QAM	QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM	BPSK, QPSK, OQPSK, 8PSK, 16QAM	BPSK, QPSK, OQPSK, 8APSK, 8PSK, 16APSK	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK	BPSK, QPSK, 8QAM, 8PSK, 16QAM
Roll-off	0,05; 0,2	0,05; 0,2	0,25	0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35	Нет данных	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25	0,05; 0,1; 0,2; 0,3
Диапазон символьных скоростей, ксимв/с	На прием TDM: 300–500000; на передачу TDMA: 100–8000 с шагом 1 ксимв/с	На прием TDM: 300–500000; на передачу TDMA: 100–8000 с шагом 1 ксимв/с	64–24000	2000–49900	4–1500	9,6–49750	128–25000	42–20000
Диапазон информационных скоростей, Кбит/с	На прием TDM: 150–225000; на передачу TDMA: 100–26700	На прием TDM: 150–225000; на передачу TDMA: 100–26700	64–20000	2000–155000	2–4500	Нет данных	126,5–111325,6	42–20000
Диапазон входных/выходных частот, МГц	950–2150 с шагом 1 кГц	950–2150 с шагом 1 кГц	950–2150 с шагом 100 Гц	52–88; 104–176; 950–2150 с шагом 100 Гц	800–2200; 52–88 (в версии ПЧ 70 МГц) с шагом 100 Гц	950–2150	950–2150 с шагом 100 Гц	950–2150 с шагом 100 Гц
Помехоустойчивые коды	На прием для TDM: LDPC+BCH (DVB-S2 & DVB-S2X); на передачу TDMA: LDPC	На прием для TDM: LDPC+BCH (DVB-S2 & DVB-S2X); на передачу TDMA: LDPC	Сверточные, решетчатые, каскадные, турбокоды (LDPC, VersaFEC - опционно)	LDPC	Viterbi, TCM, TPC, LDPC/BCH	VIT, SEQ, TCM; внешний код Рида-Соломона и DVB-S, TPC	LDPC/BCH	VIT, TCM, RS, TPC (опция), LDPC/BCH (опция)
Кодовые скорости	На прием для TDM: DVB-S2 & DVB-S2X MODCOD; на передачу TDMA 1/2; 2/3; 3/4; 5/6	На прием для TDM: DVB-S2 & DVB-S2X MODCOD; на передачу TDMA 1/2; 2/3; 3/4; 5/6	Для сверточных кодов: 1/2; 2/3; 3/4; 7/8; для решетчатого кодирования: 2/3; для турбокодов: 5/16; 21/44; 0,495; 3/4; 0,793; 7/8; 0,95	1/2; 26/45; 23/36; 13/18; 3/4; 4/5; 5/6; 7/8	Viterbi 1/2; 3/4; 7/8; TCM (8PSK – 2/3 16QAM – 3/4); TPC – 1/2; 3/4 (для 8PSK и 16QAM только 3/4); LDPC – 5/16; BCH	Нет данных	1/2; 2/3; 3/4; 4/5; 5/6; 8/9; 9/10	1/2; 2/3; 3/4; 7/8
Относительная нестабильность частоты выходного сигнала	Не специфицируется. Определяется сигналом центральной станции (HUB)	$\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$	Нет данных	$1 \cdot 10^{-8}$	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
Максимально возможная полоса поиска частоты входного сигнала, кГц	Для TDM: ± 20 программируемая с шагом 1 кГц	Для TDM: ± 20 программируемая с шагом 1 кГц; для TDMA: ± 6 ; ± 12 ; ± 24 ; ± 40	± 30 программируемая с шагом 1 кГц	± 30	± 30 программируемая с шагом 100 Гц	Нет данных	$\pm 20\%$ от символьной скорости	± 30 программируемая с шагом 1 кГц
Диапазон уровней входного сигнала, дБм	$-(105...130) + 10\lg(B)$, где B – символьная скорость в ксимв/с	$-(105...130) + 10\lg(B)$, где B – символьная скорость в ксимв/с	$-130\text{дБм} + 10\lg(B)$, где B – символьная скорость в ксимв/с	$-(40...0)$	L-диапазон: $-75\text{дБм}...20\text{дБм}$, для ПЧ-версии: $-60\text{дБм}...0\text{дБм}$	Нет данных	$-75...-5$	$-(80...130) + 10\lg(B)$, где B – символьная скорость в ксимв/с
Год разработки	2017	2017	2017	2015	2019	2016	2018	2018

Таблица 3

Требуемое отношение сигнал/шум (E_b/N_0) на входе рассматриваемых модемов для получения заданной вероятности ошибки на выходе (по данным производителей)

Модемы		UHP 1XX (Истар)					UHP 2XX (Истар)					M-64 (ЛОНИИР)			MD100SE (Радисан)		CM-2.6M (Радис Лтд)		Цифровой модем ЯР-1040 (Феникс)				ЭТРА-МД9L (Этра-Плюс)			
Режим	Характеристики режима	Режим DVB-S2, символьная скорость 20 Мсимв/с, Roll-off 5%, BER≤10 ⁻⁸ , без пилот-сигнала					Режим DVB-S2, символьная скорость 20 Мсимв/с, Roll-off 5%, BER≤10 ⁻⁸ , без пилот-сигнала					FDMA SCPC; TPC; BER≤10 ⁻⁸			FDMA SCPC; LDPC; BER≤10 ⁻⁷		FDMA SCPC; TPC; BER≤10 ⁻⁷		FDMA SCPC; LDPC/BCH; BER = 10 ⁻⁸				FDMA SCPC; TPC; BER = 10 ⁻⁷			
	Требуемое отношение E_b/N_0	FEC	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	21/44	3/4	7/8	3/4	7/8	1/2	3/4	2/3	3/4	5/6	9/10	3/4	7/8	
1	QPSK	2,4	2,8	3,1	3,4	3,0	2,4	2,8	3,1	3,4	3,0	3,3	4,0	4,2	4,0	4,3	3,0	3,5	3,8	4,4	5,4	6,7	4,0	6,6		
	8PSK	4,1	4,9	-	5,9	6,9	4,1	4,9	-	5,9	6,9	-	6,4	6,8	-	-	-	8,0	7,3	8,4	9,8	11,4	6,6	7,6		
	16APSK	5,4	6,1	6,7	7,0	8,0	5,4	6,1	6,7	7,0	8,0								10,0	10,7	12,1	13,4				
	32APSK	-	8,3	9,1	9,8	11,5	-	8,3	9,1	9,8	11,5									-	13,2	14,9	16,6			
	64APSK	-	-	14,7	15,6	-	-	-	14,7	15,6	-															
	16QAM												8,2	8,4	7,5	8,2		8,0						8,1	8,6	
2	Характеристики режима	Режим TDMA, символьная скорость 1 Мсимв/с, Roll-Off 5%, BER≤10 ⁻⁸					Режим TDMA, символьная скорость 1 Мсимв/с, Roll-Off 5%, BER≤10 ⁻⁸					FDMA SCPC; VIT+RS(220,200); BER≤10 ⁻⁷					FDMA SCPC; LDPC/BCH; BER≤10 ⁻⁸						FDMA SCPC; LDPC/BCH; BER = 10 ⁻⁷			
	Требуемое отношение E_b/N_0	FEC	1/2	2/3	3/4	5/6	1/2	2/3	3/4	5/6	1/2	3/4	7/8					4/9	11/15					2/3	3/4	
	QPSK	2,8	3,0	3,5	4,2	2,8	3,0	3,5	4,2	4,4	5,7	6,6						2,0	3,0					2,8	3,0	
	8PSK	8,0	6,8	6,4	7,2	8,0	6,8	6,4	7,2									-	6,0					5,6	6,0	
	16APSK	11,4	10,2	9,9	10,2	11,4	10,2	9,9	10,2																	
	16QAM												8,0	9,4					6,5						-	6,9

Таблица 4

Особенности характеристик отдельных моделей отечественных спутниковых модемов (по данным производителей)

Абонентские цифровые модемы-маршрутизаторы серии UHP 1XX (ИСТАР)	Узловые цифровые модемы-маршрутизаторы серии UHP 2XX (ИСТАР)	Цифровой модем M-64 (ЛОНИИР)	Спутниковый цифровой модем MD100SE (Радисан)	Спутниковый цифровой модем CM-20M (РАДИС Лтд.)	Цифровой модем РМД-01М (РНИИРС)	Цифровой модем ЯР-1040 (Феникс)	Спутниковый модем ЭТРА-МД9L (IESS, с функцией ОПЧ) (ЭТРА-Плюс)
<ul style="list-style-type: none"> Режимы DVB-S2/S2X Маршрутизатор L3, мост L2 Функция AUPC – автоматическое управление мощностью на линии вверх Функция ACM – адаптивная кодовая модуляция Два одновременно работающих демодулятора TDM IP-маршрутизатор модема обеспечивает производительность до 150 000 rps и расширенный QoS Работа в сетях TDM/TDMA Используется программно-управляемая архитектура при работе в сетях VSAT 	<ul style="list-style-type: none"> Режимы DVB-S2/S2X Маршрутизатор L3, мост L2 Функция AUPC Функция ACM Два одновременно работающих демодулятора TDM и до 4-х TDMA IP маршрутизатор модема обеспечивает производительность до 190 000 rps и расширенный QoS Работа в сетях TDM/TDMA Система контроля и управления NMS абонентскими терминалами и спутниковой сети в целом Формирует сигналы сетевой синхронизации Поддержка резервирования по схеме 1:1 без специального контроллера Встроенный генератор опорной частоты 10 МГц TCP Acceleration Работа с многлучевыми спутниками класса HTS Используется программно-управляемая архитектура при работе в сетях связи 	<ul style="list-style-type: none"> Функция AUPC Overhead – уплотненный канал для передачи дополнительной информации Использование для управления модемом процессора с архитектурой ARM-9, что позволяет портировать в ядро управления модема операционную систему Linux и в результате дает возможность использовать при написании встроенного программного обеспечения стандартные сетевые протоколы 	<ul style="list-style-type: none"> Функция ACM 	<ul style="list-style-type: none"> Режимы DVB-S2, DVB-RCS Функция AUPC 	<ul style="list-style-type: none"> Нет данных 	<ul style="list-style-type: none"> Режим DVB-S2 Маршрутизатор L3, мост L2 Функция AUPC Функция ACM Режим РКН – компенсатор собственной несущей при работе в одной полосе частот на прием и передачу (аналогичен функции «несущая в несущей») Модем работает на базе собственной универсальной платформы, реализующей новейшую технологию SDR (Software-defined radio – программно конфигурируемое радио) 	<ul style="list-style-type: none"> Функция ОПЧ (одна полоса частот – аналогична функции «несущая в несущей») Функция AUPC, в том числе для режима ОПЧ Реализуется управление удаленным модемом Формирование сигналов автосопровождения антенны Встроенный аппаратный вокодер для служебной связи по асинхронным каналам

отечественных спутниковых модемов представлены в табл. 2–4. В табл. 3 для получения данных о требуемом отношении сигнал/шум (E_b/N_0) на входе модемов и за-

данной вероятности ошибки на выходе были выбраны только наиболее интересные, с точки зрения авторов, режимы рассматриваемых изделий.

ЛУЧШИЕ СОВРЕМЕННЫЕ ИНОСТРАННЫЕ МОДЕМЫ

В настоящее время в мире насчитывается несколько десятков производителей спутниковых модемов. Наиболее известные лидеры рынка приведены в врезе 2.

Подробное описание модемов, выпускаемых компаниями-лидерами, превышает пределы объема статьи. Поэтому для сравнения с продукцией российских производителей рассмотрим основные характеристики двух типичных современных моделей компаний: Comtech EF Data и Teledyne Paradise Datacom (табл. 5).

Необходимо упомянуть и о практическом использовании передовой технологии будущего SDR при создании спутниковых модемов. Например, инновационный модем SX-3000B фирмы SatixFy (Израиль, <http://www.satixfy.com>) [19] выполнен в формате одной СБИС («все в одном») (рис. 2), его характеристики приведены в табл. 6, а функциональная схема – на рис. 3. На рис. 4 и в табл. 7 представлен малогабаритный спутниковый терминал на базе модема SX-3000B.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СПУТНИКОВЫХ МОДЕМОВ

Сравнительный анализ современных российских спутниковых модемов и их зарубежных аналогов показывает следующее:

1. Отечественное производство модемов в целом развивается в русле мировых тенденций, но с некоторым отставанием во времени.

2. У зарубежных производителей стало нормой использование в производимых моделях нового высокоэффективного стандарта DVB-S2X. В российских модемах он пока не используется (кроме тех, что выпускает ООО «ИСТАР»).

3. Иностранные модемы предлагают более высокую скорость передачи информации (до 720 Мбит/с) и меньшие на 0,5–1,5 дБ, при прочих равных условиях, пороговые отношения E_b/N_0 .

4. Зарубежные производители используют более мощные запатентованные методы экономии потребной

Рисунок 2

Спутниковый модем SX-3000B



Врез 2

Ведущие зарубежные производители спутниковых модемов

<p>Comtech EF Data Corporation (США), www.comtechefdata.com Входит в Comtech Telecommunications Corp.</p> <p>Решения для спутниковых сетей VSAT. Оборудование сетевых спутниковых платформ: Hub, Gateway, инкапсуляторы. Продукты для оптимизации RAN/WAN. Радиочастотное оборудование для аппаратуры спутниковой связи: частотные конвертеры, твердотельные усилители мощности, LNA и LNB, BUC, синтезаторы частот. Спутниковые модемы-маршрутизаторы серий CDM, CDD, SLM, DMD</p>
<p>Teledyne Paradise Datacom Ltd. (США), www.paradisedata.com Входит в Teledyne Technologies Incorporated</p> <p>Активное и пассивное телекоммуникационное оборудование СВЧ: твердотельные усилители мощности, малошумящие усилители, частотные конвертеры, управляемые генераторы и аттенуаторы, переключатели, делители и сумматоры мощности, смесители и др. Спутниковые модемы-маршрутизаторы серии Q-Flex программно-конфигурируемые, в том числе для работы в спутниковых системах LEO</p>
<p>Hughes Network Systems (США), www.hughes.com Входит в корпорацию Hughes Space Communications</p> <p>Предоставление в аренду спутникового ресурса на собственном созвездии ИСЗ связи серий EchoStar, Spaceway. Операторские услуги по предоставлению пользователям сервисов спутниковой связи и вещания собственной системы Hughes Net. Станции спутниковой связи центральные (Hub) и оконечные – стационарные и подвижные (Terminal). Спутниковые модемы-маршрутизаторы серий HN, HM, HT, HX</p>
<p>ViaSat Inc. (США), www.viasat.com</p> <p>Операторские услуги сетей для стационарной и мобильной спутниковой связи, для ТВ-вещания, а также для доступа в интернет по технологии VSAT. Телекоммуникационное оборудование спутниковой связи: <ul style="list-style-type: none"> земные станции: центральные (Hub) и оконечные (Terminal), стационарные и мобильные, а также их элементы – антенны, контроллеры управления наведением антенн, TCP/IP акселераторы и др.; комплексы управления спутниковыми сетями и др.; аппаратура управления и телеконтроля спутников. Оборудование сетей наземной сотовой связи. Аппаратура засекречивания радиоканалов. Услуги в области ИТ-безопасности. Спутниковые модемы – маршрутизаторы серий LinkWay, JIPM, EBEM, SurfBeam</p>
<p>Gilat Satellite Networks Ltd. (Израиль), www.gilat.com</p> <p>Решения для VSAT-сетей: станции спутниковой связи центральные (Hub) и оконечные – стационарные и подвижные (Terminal) для ж/д, морского, автомобильного и авиационного применения, в т.ч. для USV и UAS. Оборудование мультисервисных сетей спутниковой связи – радиочастотные усилители, спутниковые антенны, в том числе ФАР и др. Оборудование сетей сотовой связи. Спутниковые модемы серий SkyEdge II, Taurus, GLT, MLT</p>
<p>iDirect (США), www.idirect.net</p> <p>Операторские услуги сетей спутниковой связи и ТВ-вещания. Телекоммуникационное оборудование спутниковой связи: земные станции (центральные и оконечные), а также их элементы – антенны, LNB, BUC и др. Спутниковые модемы-маршрутизаторы серий Evolution, iFINITI, Velocity и др.</p>
<p>Datum Systems (США), www.datumsystems.com</p> <p>Спутниковые модемы серии M7</p>
<p>Avantech Wireless (Канада), www.avantechwireless.com</p> <p>Радиочастотная аппаратура для спутниковых и радиорелейных линий: Усилители мощности. Импульсные усилители. Трансиверы. Частотные преобразователи. Тест-трансляторы. Антенны и контроллеры. LNA/LNB и др. Спутниковые модемы серии AMT</p>
<p>Newtec (Бельгия), www.newtec.eu</p> <p>Аппаратура спутниковой связи – хабы, терминалы VSAT, коммутаторы, частотные конвертеры и др., спутниковые модемы серий MDM, MCX, SMB</p>

полосы частот спутникового ресурса.

5. Отечественные модемы значительно уступают зарубежным аналогам по дополнительным сервисным

Таблица 5
Характеристики двух типичных современных зарубежных модемов

Характеристики	Значения													
	CDM-760 (Comtech EF Data)								QFlex-400™ P2MP (Teledyne)					
Топология сети	Точка–точка								Точка–точка, точка–многоточка					
Протоколы (режимы) работы	DVB-S2/S2X, DVB-S2-EB1 & EB2								DVB-S2/S2X					
Способы МСД	FDMA SCPC								FDMA SCPC, TDMA					
Вид модуляции	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK								QPSK, OQPSK, 8PSK, 8APSK, 8QAM, 16APSK, 16QAM, 32APSK, 64QAM					
Диапазон символьных скоростей, ксимв/с	100–150000								18–40000					
Информационные скорости модема, кбит/с	От 0,1 до > 720 Мбит/с (симплекс) > 1,4 Гбит/с (дуплекс)								18–100000					
Коэффициент округления, %	5; 10; 15; 20; 25; 35								5; 10; 15; 20; 25; 35					
Диапазон входных/выходных частот, МГц	70/140 и 950–2150 с шагом 100 Гц								950–2450 с шагом 100 Гц					
Помехоустойчивые коды	LDPC, BCH								LDPC, TPC					
Кодовые скорости	1/4; 1/3; 2/5; 1/2; 3/5; 2/3; 3/4; 4/5; 5/6; 8/9; 9/10 и др.								DVB-S2 1/2; 2/3; 3/4; 4/5; 8/9; 9/10; для DVB-S2X 13/45; 9/20; 11/20; 13/18					
Относительная нестабильность частоты выходного сигнала	±6·10 ⁻⁸								1·10 ⁻⁸					
Максимально возможная частота поиска входного сигнала, кГц	Нет данных								±255					
Диапазон уровней входного сигнала, дБм	Minimum: –58 + 10 log (symbol rate) maximum: –23 + 10 log (symbol rate)								Minimum: –130 + 10 log (symbol rate) maximum: –68 + 10 log (symbol rate)					
Уровни сигнал/шум, дБ Eb/N0 при BER=10 ⁻⁷ (DVB-S2X)	FEC	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	8/9	9/10	FEC	1/2	2/3	3/4	4/5	
	QPSK	1,5	2,2	2,7	3,0	3,3	4,0	4,2	QPSK	1,1	2,0	2,4	2,6	
	8PSK	2,7	3,6	4,8	–	5,8	6,9	7,1	8PSK	–	4,0	4,6	–	
	16APSK	3,4	5,4	6,0	6,5	6,9	7,8	8,1	16APSK	–	5,2	5,8	6,2	
	32APSK	–	6,3	7,6	8,1	8,7	9,9	10,1	32APSK	–	–	7,3	7,8	
Дополнительные специфические функции	<p>Маршрутизатор L3, мост L2 Режим «несущая в несущей» – компенсатор собственной несущей при работе в одной полосе частот сигналов на прием и передачу Функция AUPC – автоматическое управление мощностью Режимы ACM и SCM – адаптивное и постоянное кодирование и модуляция Функция DPD – динамические предсказания Встроенный высокоскоростной пакетный процессор (350000 pps дуплекс) Акселерация IP/TCP трафика со сжатием заголовков, сжатием полезной информации, обеспечением QoS и режимом управляемой коммутации Мультиплексирование трафика IP/Ethernet и G.703</p>								<p>Дистанционное программное конфигурирование Маршрутизатор L3, мост L2 Функция AUPC – автоматическое управление мощностью Функция VCM – переменное кодирование и модуляция Функция ACM – адаптивное кодирование и модуляция Функция LinkGuard – определение помехи Функция Q-NET Navigator – контроль и управление сетью Встроенные функции монитора спектра и созвездия, Bit-tester Демодуляция и разделение до 16 потоков трафика Акселерация IP/TCP трафика – компрессия заголовков и полезной информации, динамическая маршрутизация, формирование трафика Режим «несущая в несущей» – компенсатор собственной несущей при работе в одной полосе частот сигналов на прием и передачу (для модели Q-Flex P2MP)</p>					
Год создания	2017								2017					

Таблица 6
Характеристики спутникового модема SX-3000B

Характеристики	Значения
Топология сети	Точка–точка; точка–многоточка
Протоколы (режимы) работы	DVB-S2X, DVB-RCS2
Полоса частот	Поддержка широкополосных транспондеров 500 МГц на спутниках класса HTS
Тип спутниковых систем	С прыгающими антенными лучами
Количество каналов приема	4
Чувствительность	Прием с низким отношением сигнал/шум (малогобаритные антенны)
Технология	SDR (Software Defined Radio)
Информационная скорость	3 Гбит/с, три интерфейса Ethernet
Шифрование	Встроенный механизм шифрования AES 256
Центральный процессор	Двухъядерный хост MIPS 32-битный процессор для нескольких приложений под управлением ОС Linux и бесплатной ОСРВ
Обработка сигналов	Несколько цифровых сигнальных процессоров CEVA XC-323
Обратный канал	MF-TDMA, 20 Мсимв/с

Рисунок 3

Структура спутникового модема SX-3000B

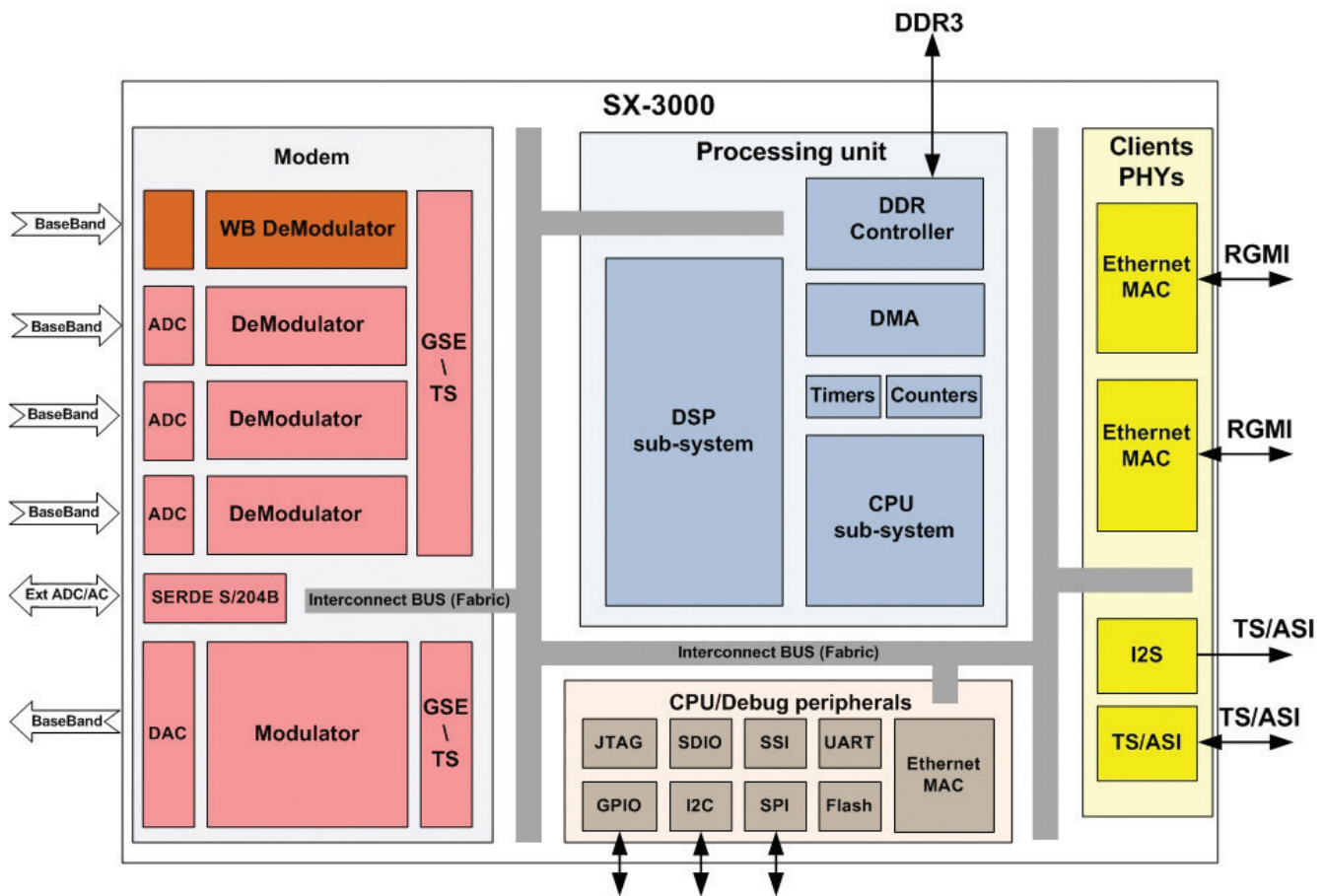


Таблица 7

Характеристики спутникового терминала на базе модема SX-3000B

Характеристики	Значения
Терминал	Миниатюрный блок внутреннего исполнения L-диапазона
Использование	Для систем Ku- и Ka-диапазона
Основа	Базируется на использовании модема SX-3000B
Размеры, см	7,5×7,5
Стоимость	Доступный по цене терминал
Исполнение	Корабельное

функциям (встроенный спектр-анализатор, предупреждение о наличии частотных помех, встроенный bit-tester, акселерация спутникового TCP/IP-трафика, дистанционный контроль и управление сетью связи, одновременная демодуляция и распределение нескольких информационных потоков и др.).

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Анализ приведенных материалов позволил выявить следующие тенденции развития техники спутниковых модемов на среднесрочную перспективу:

- Дальнейшее улучшение основных электрических характеристик:

Рисунок 4

Спутниковый терминал на базе модема SX-3000B



Фото: https://www.satixfy.com/product_category/modems

- снижение вероятности ошибок при передаче информации — приближение к пределу Шеннона до 0,2–0,3 дБ;
 - повышение максимальной скорости передачи/приема информации до 150 Мбит/с–1 Гбит/с и более за счет внедрения новых методов модуляции и кодирования;
 - увеличение функциональной интеграции модемов с другими устройствами обработки сигналов тракта передачи информации в спутниковых радиоприемах, например с маршрутизатором, многопортовым встроенным коммутатором Ethernet или Firewall;
 - использование технологии OFDM, которая позволяет успешно преодолевать негативные последствия многолучевости распространения радиоволн на спутниковых трассах, проходящих под низкими углами к горизонту;
 - увеличение степени конструктивной интеграции устройств, а именно размещение всех их функциональных узлов, кроме источника питания, на одной многослойной печатной плате.
- Улучшение эксплуатационных характеристик модемов:
- программное управление всеми функциями и режимами работы;
 - повышение универсальности устройств, что проявляется в поддержке и оперативном программном изменении многочисленных типов интерфейсов и разнообразии видов кодирования и модуляции сигналов, алгоритмов и протоколов информационного обмена на базе использования технологии SDR [16, 17, 20–23], а также в постоянном расширении диапазона скоростей передачи информации;
 - внедрение в функционал многостанционного доступа возможностей настройки группового качества обслуживания (Group Quality of Service, GQoS) и приоритизации, что позволяет динамически менять выделяемую полосу для каждого приложения в зависимости от потребности в режиме реального времени;
 - снижение стоимости (для массовых моделей), в частности за счет использования выпускаемых крупными сериями специализированных СБИС, возможности которых по обработке информации и стоимость зависят от программной «прошивки» при одном и том же «железе».
- Широкое использование технических решений,

позволяющих уменьшить потребность в частотном ресурсе:

- последних версий технологии адаптивного кодирования и модуляции (Adaptive Coding and Modulation, ACM);
- технологии совмещения в одной полосе частот прямого и обратного спутниковых каналов (Paired Carrier Multiple Access, PCMA).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделаем краткие выводы по результатам работы:

1. Выявлены основные отечественные производители спутниковых модемов, присутствующие на рынке.
2. Определены основные целевые характеристики спутниковых модемов.
3. Рассмотрены характеристики модемов гражданского и двойного назначения для перечисленных отечественных производителей. Охарактеризованы их отличительные черты.
4. Проведен сравнительный анализ производимых в России спутниковых модемов с лучшими зарубежными образцами.
5. Даны прогнозные тенденции развития спутниковых модемов на среднесрочную перспективу.

Результаты данного обзора свидетельствуют о том, что в РФ к настоящему времени сформировался рынок спутниковых модемов, выпускаемых отечественными предприятиями. Число таких производителей относительно невелико, но их продукция имеет технические характеристики, в основном соответствующие современному мировому уровню или незначительно уступающие западным аналогам.

Использование рассмотренных в обзоре моделей спутниковых модемов позволяет создавать станции спутниковой связи, конкурентоспособные на российском рынке.

Однако пока сохраняется проблема выпуска необходимого номенклатуры спутниковых модемов, имеющих статус ТОРП. Хочется надеяться, что она будет решена в обозримом будущем.

В дальнейшем авторский коллектив намерен продолжить серию обзоров рынка отечественных функциональных устройств земных станций спутниковой связи.

Авторы выражают благодарность сотрудникам предприятий — производителей спутниковых модемов: НПП «ЭТРА Плюс», ФГУП НИИР–ЛОНИИР, компаний «ИСТАР», «РАДИАН», «РАДИС», Инжинирингового бюро «Феникс», предоставившим материалы по техническим характеристикам изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бобков, В.Ю.** Спутниковые модемы / В.Ю. Бобков, М.В. Ефимов, В.И. Нагорнов // Сети и системы связи. – 1997. – № 8 – С. 72-78.
- 2. Диденко, М.Г.** Спутниковые модемы систем фиксированной связи на основе геостационарных ИСЗ / М.Г. Диденко // Технологии и средства связи. – 2000. – № 1. – С. 72-77.
- 3. Диденко, М.Г.** Модемы фиксированных спутниковых систем связи / М.Г. Диденко // Каталог «Спутниковая связь 2000». – Приложение к журналу «Технологии и средства связи». – 2000. – С. 42-46.
- 4. Калашников, Н.И.** Системы связи через ИСЗ / Н.И. Калашников. – М.: Связь, 1969.
- 5. Фортюшенко, А.Д.** Основы технического проектирования систем связи с помощью ИСЗ / А.Д. Фортюшенко. – М.: Связь, 1970. – 344 с.
- 6. Фортюшенко, А.Д.** Основы технического проектирования аппаратуры систем связи с помощью ИСЗ / А.Д. Фортюшенко. – М.: Связь, 1972. – 344 с.
- 7. Витерби, Э.Д.** Принципы когерентной связи / Э.Д. Витерби. – М.: Сов. радио, 1970.
- 8. Спилкер, Дж.** Цифровая спутниковая связь / Дж. Спилкер. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
- 9. Питерсон, У.** Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М.: Мир, 1976. – 600 с.
- 10. Витерби, А.Д.** Принципы цифровой связи и кодирования / А.Д. Витерби, Д.К. Омара. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
- 11. Кларк, Дж. мл.** Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. мл. Кларк, Дж. Кейн. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.
- 12. Банкет, В.Л.** Цифровые методы в спутниковой связи / В.Л. Банкет, В.М. Дорофеев. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
- 13. Банкет, В.Л.** Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В.Д. Банкет. – Одесса: Феникс, 2009. – 180 с.
- 14. ETSI TR 102 376 V1.1.1 (02-2005):** Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for broadcasting; Interactive services; News gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
- 15. European Standard N 302 307-2 V1.1.1 (10-2014):** Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure; Channel modulation coding and modulation systems for broadcasting; Interactive services; News gathering and other broadband satellite applications. Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X).
- 16. Dillinger, M.** Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions / M. Dillinger, K. Madani, N. Alonistioti. – Wiley & Sons, 2003. – 454 p.
- 17. Богатырев, Е.В.** Разработка и исследование модемов помехозащищенных станций спутниковой и тропосферной связи / Евгений Владимирович Богатырев // Дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2018.
- 18. Datum Series Modular Satellite Modem** M7. – URL: http://emeasat.com/www/files/pdf/Datum_M7_Main-Manual_0-08.pdf.
- 19. Abraham, T.** Satisfy's Technology: Building Blocks for low cost high performance satellite systems / T. Abraham // 15th BroadSkyWorkshop. Commercial Space Applications: Transformation, Fusion and Competition. – Trieste, Italy. – 16-19 October 2017.
- 20. Руднев, П.** Технологии SDR на службе у разработчиков систем / П. Руднев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – № 7. – С. 52-54.
- 21. Lisi, M.** Software Defined Radio: An Enabling Technology for Interoperability in Federated Satellite Systems. – European Space Agency – ESTEC Special Advisor of the European Commission // 2nd Federated Satellite Systems Workshop. – 2014.
- 22. Maheshwarappa, Mamatha R.** Software Defined Radio Architecture for Concurrent Multi-Satellite Communications: Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy from the University of Surrey. – Surrey Space Centre Faculty of Electronics and Physical Sciences University of Surrey Guildford, Surrey GU2 7XH, UK 2016.
- 23. Wang, B.** Software Defined Radios are key to satellite direct to future smartphone communication. – 20 September 2018. – URL: <https://www.nextbigfuture.com/2018/09/software-defined-radios-are-key-to-satellite-direct-to-future-smartphone-communication.html>.

Получено 07.08.19

СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В НОМЕРЕ

БГУ	7	МГИМО МИД РФ	6	ООН	4-7	СМАРТС	8-10
ВВА им. Н.Е. Жуковского	49-55	МГТУ им. Н.Э. Баумана	76-82	Профсоюз работников связи РФ	3	Созвездие	12-17
ВИСАТ-ТЕЛ	37-43	МГЮА	5	РАДИАН	35	СПБГУТ	44-48, 61-66
ДГТУ	18-21	МИД РФ	5	РАДИС	35	Т8	10
ЕКА	7	МИКП	4-7	РКС	22-26	Университет ИТМО	8-10
ЕЦКП	4	Минобрнауки РФ	8	Роскосмос	5	Феникс	35
Интерспутник	4, 7	МСЭ	12-17	Ростелеком	12-17	ЦНИИмаш	5, 6
ИСТАР	35	МФТИ	37-43	РУДН	4, 5, 7	ЭТРА Плюс	35
Кванттелеком	10	НИИР	12-17, 27-35, 44-48, 56-60	Самарский НИУ им. С.П. Королева	5, 7	ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова	18-21
ЛОНИИР	35	НИИТС	12-17	Сконтел	10		