

УДК 621.376

Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-224-238

Для цитирования: Жаринов В. Ф., Пономарев О. Г., Бобков И. В. Особенности реализации спутниковой системы связи на высокоэллиптической орбите «Экспресс-РВ» // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 2. С. 224–238. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-224-238.

For citation: Zharinov V. F., Ponomarev O. G., Bobkov I. V. [Features of the implementation of the satellite communication system in the highly elliptical orbit “Express-RV”]. *Siberian Aerospace Journal*. 2025, Vol. 26, No. 2, P. 224–238. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-224-238.

Особенности реализации спутниковой системы связи на высокоэллиптической орбите «Экспресс-РВ»

В. Ф. Жаринов^{*1,2}, О. Г. Пономарев¹, И. В. Бобков²

¹Томский государственный университет

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: jarinov.slava@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена создаваемой в настоящий момент спутниковой системе «Экспресс-РВ». Основным назначением описываемой системы является предоставление абонентам на территории РФ и Северного морского пути доступа в Интернет.

Предметом исследования являются основные особенности реализации системы «Экспресс-РВ», касающиеся связи в прямом и обратном спутниковом канале. Среди основных особенностей спутниковой системы, помимо высокоэллиптической орбиты, можно выделить многолучевое покрытие зоны обслуживания, прямую ретрансляцию сигнала и выбор стандартов спутниковой связи DVB-S2X и DVB-RCS2. Для реализации многолучевого покрытия зоны обслуживания и прямой ретрансляции используется многолучевая полезная нагрузка Ки-диапазона. В связи с этим ее описанию уделяется особое внимание.

Цель работы: провести анализ особенностей и энергетических параметров спутниковой системы «Экспресс-РВ» для подтверждения её работоспособности, а также определить режимы работы в прямом и обратном канале по стандартам DVB-S2X и DVB-RCS2.

Методология: анализ основных решений разрабатываемой системы «Экспресс-РВ», спутниковых стандартов DVB-S2X и DVB-RCS2 и рекомендаций Международного союза радиосвязи ITU-R P.618-13, теоретический расчет энергетического бюджета радиолинии.

Результаты работы подтверждают работоспособность системы, так как установлена возможность квазибезошибочного приема сигналов DVB-S2X и DVB-RCS2 при условии идеального выполнения процедур синхронизации. Кроме того, на основании проведенного расчета сделан вывод о фактически используемых видах модуляции в обратном канале из представленных в стандарте DVB-RCS2 для трех видов абонентских терминалов. Для прямого канала установлено, что режим

передачи определяется абонентом с наименьшим соотношением $\frac{E_S}{N_0}$, т. е. с наименьшим диаметром рефлектора.

Область применения результатов: результаты применяются для дальнейшей разработки спутниковой системы «Экспресс-РВ».

Ключевые слова: система спутниковой связи, высокоэллиптическая орбита, многолучевая полезная нагрузка, прямой канал, обратный канал, DVB-S2X, DVB-RCS2.

Features of the implementation of the satellite communication system in the highly elliptical orbit “Express-RV”

V. F. Zharinov^{*1, 2}, O. G. Ponomarev¹, I. V. Bobkov²

¹Tomsk State University

36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

²JSC “Information Satellite Systems” Academician M. F. Reshetnev Company”

52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

E-mail: jarinov.slava@yandex.ru

Abstract. This article addresses the Express-RV satellite system, which developers are currently creating. Its primary purpose is to provide subscribers in the Russian Federation and the Northern Sea Route with internet access. The subject of the study is the main features of the Express-RV system implementation, concerning communication in the forward and reverse satellite channel. Among the main features of the satellite system, in addition to the highly elliptical orbit (HEO), we can highlight multi-beam coverage of the service area, direct signal retransmission and the choice of DVB-S2X and DVB-RCS2 satellite communication standards. To implement multi-beam coverage of the service area and direct retransmission, the system employs a multi-beam Ku-band payload. Therefore, the work prioritizes the description of this payload.

Objective of the work: to analyze the features and energy parameters of the Express-RV satellite system to confirm its operability, as well as to determine the operating modes in the forward and reverse channels according to the DVB-S2X and DVB-RCS2 standards.

Methodology: analysis of the main solutions of the Express-RV system being developed, the DVB-S2X and DVB-RCS2 satellite standards and the recommendations of the International Radiocommunication Union ITU-R P.618-13, theoretical calculation of the energy budget of the radio link.

The results confirm the system’s operability, as the study demonstrates the possibility of quasi-error-free reception of DVB-S2X and DVB-RCS2 signals under ideal synchronization conditions. In addition, based on the calculation, we identify the actually used types of modulation in the return channel from those presented in the DVB-RCS2 standard for 3 types of subscriber terminals. For the forward channel, the analysis reveals that the transmission mode adapts to the terminal with the smallest reflector diameter, eliminating benefits from larger-aperture terminals.

Scope of application of the results: the researchers and engineers use the results to further develop the Express-RV satellite system.

Keywords: satellite communication system, highly elliptical orbit, multi-beam payload, forward link, return link, DVB-S2X, DVB-RCS2.

Введение

Постоянный рост объемов передаваемых данных приводит к необходимости увеличения телекоммуникационной инфраструктуры. Во всем мире, в том числе в России, ведутся интенсивные научно-исследовательские работы в области систем связи [1–3]. Для России, около 80 % территории которой не имеет покрытия сотовыми сетями, потенциал спутниковых систем связи, а также целесообразность и экономическая эффективность их применения дополнительно повышаются.

В ответ на растущий спрос на спутниковую связь в России ведутся работы по созданию нескольких спутниковых группировок нового поколения на негеостационарных орбитах: «Экспресс-РВ», «Скиф», «Марафон-IoT», «Рассвет». Спутниковая система «Экспресс-РВ», предназначенная для предоставления стационарным и подвижным абонентам на территории России и Северного морского пути доступа в Интернет, имеет особую значимость. Согласно оценкам, до 90 % северных территорий России не имеет покрытия сотовыми и спутниковыми сетями. В контексте технологического суверенитета страны ее разработка является важной задачей.

Данная статья посвящена основным особенностям реализации спутниковой системы «Экспресс-РВ». Ключевой особенностью системы является многолучевая полезная нагрузка Ку-диапазона, которая решает задачи многолучевого покрытия зоны обслуживания и прямой ретрансляции. Многолучевая полезная нагрузка определяет требования ко всей спутниковой группировке, поэтому в работе особое внимание уделено ее описанию. Другой важной особенностью спутниковой системы является выбор стандартов DVB-S2X и DVB-RCS2 для проектирования модемного оборудования. Для определения режимов работы в прямом и обратном канале из всех имеющихся в стандартах произведен расчет энергетического бюджета радиолинии. При условии выполнения процедуры синхронизации на приемной стороне установлена возможность квазибезошибочного приема радиоканалов стандартов DVB-S2X и DVB-RCS2. На основании полученных значений определены виды модуляции, которые будут использоваться в системе связи в прямом и обратном канале.

Общая характеристика спутниковой системы «Экспресс-РВ»

В связи с требованием на покрытие высоких широт при проектировании спутниковой системы выбраны высокоэллиптические орбиты (ВЭО) типа «Молния» [4; 5]. Параметры орбиты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ВЭО «Молния»

Большая полуось, км	26554
Эксцентриситет	0,722
Наклонение, °	62,8
Число космических аппаратов (КА)	4
Период обращения, ч	≈ 12
Долгота восходящего узла, °	67,7/157,7/247,7/337,7
Аргумент в перигее, °	270
Длительность рабочего участка орбиты (РУО), ч	6

Система «Экспресс-РВ» включает четыре космических аппарата (КА), орбитальные плоскости которых разнесены на 90° по долготе. Период обращения КА составляет примерно 12 ч, из которых рабочему участку орбиты соответствует район ± 3 ч от апогея. В момент, когда КА покидает рабочий участок орбиты, происходит переключение на следующий аппарат, обращающийся в смежной плоскости. Параметры орбиты выбраны таким образом, что на протяжении всего рабочего участка орбиты положение подспутниковой точки изменяется слабо. За счет этого на рабочем участке орбиты обеспечивается квазигеостационарный режим.

За сутки каждый КА проходит два витка: основной и сопряженный. При работе на основном витке, с которого обслуживается территория России, наземная трасса орбиты находится над восточным полушарием. При функционировании на сопряженном витке, предназначенном для покрытия арктических территорий, проекция орбиты оставляет след на западном полушарии (рис. 1).

Углы места абонентов, обслуживаемых с основного витка, принимают значения от 40° на краях зоны обслуживания до 90° в подспутниковой точке (рис. 2). Таким образом, для всей территории РФ углы места, как один из факторов, определяющих условия связи абонентов, остаются достаточно высокими.

Система состоит из наземного и космического сегмента. Наземный сегмент представлен центром спутниковой связи (ЦСС) и абонентскими терминалами (АТ). Основными элементами ЦСС являются антенный пост, радиочастотное и модемное оборудование, система управления связью, центр управления системой, контрольно-измерительный комплекс. В состав АТ входит

рефлектор, облучатель, система наведения, трансивер и модем. Космический сегмент состоит из платформы спутникового аппарата и полезной нагрузки. Полезная нагрузка состоит из приемных и передающих антенн и электронного оборудования между ними, обеспечивающего однократное преобразование частоты и усиление сигнала (прямая ретрансляция).



Рис. 1. Наземная трасса ВЭО

Fig. 1. HEO ground track

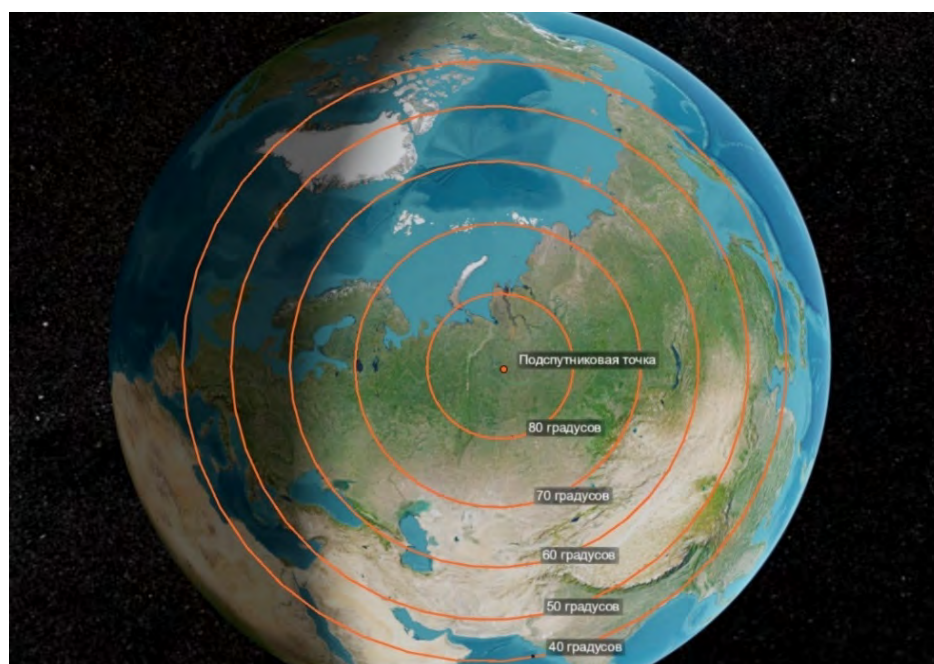


Рис. 2. Углы места абонентов, обслуживаемых с основного витка, из точки апогея

Fig. 2. Elevation angles of subscribers served from the main turn from the apogee

Полезная нагрузка включает оборудование Ку- и L/C-диапазона. Полезная нагрузка L/C-диапазона предназначена для формирования квазиглобальной зоны покрытия при помощи одного луча с основного и одного с сопряженного витка. На рис. 3, а, б показана квазиглобальная зона покрытия лучами шириной $12,5^\circ$.

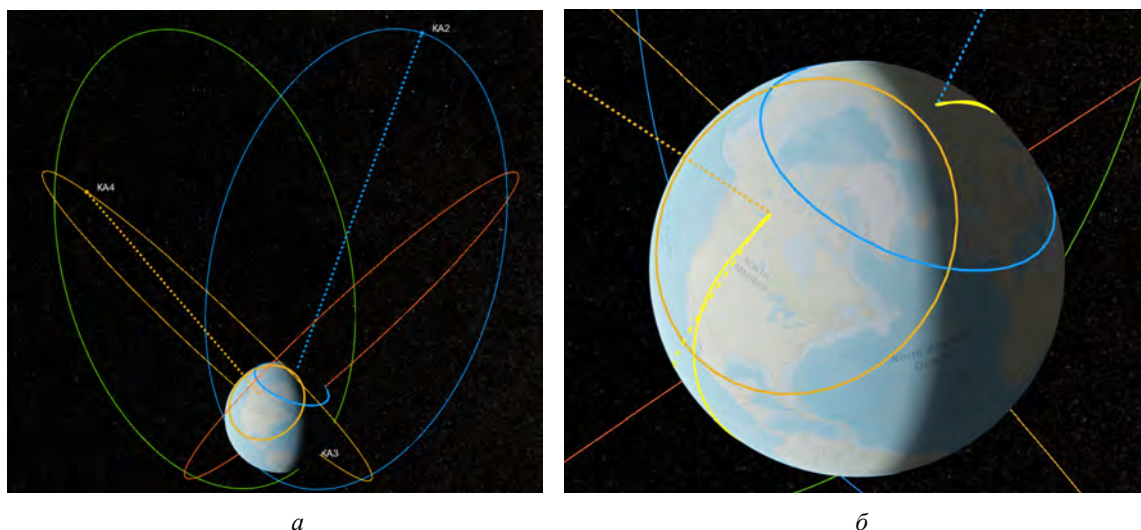


Рис. 3. Квазиглобальная зона обслуживания полезной нагрузки L/C-диапазона

Fig. 3. Quasi-global coverage area of the L/C-band payload

Многолучевое покрытие зоны обслуживания

Одним из современных трендов развития спутниковых систем является переход к разработке группировок с повышенной пропускной способностью (High Throughput Satellite, HTS) [6; 7]. Это становится возможно благодаря многолучевому покрытию зоны обслуживания, позволяющему повысить пропускную способность системы путем повторного использования частот в разных лучах и обеспечить выигрыш в энергетике радиолинии за счет большего коэффициента направленного действия антенн. Повторное использование частот позволяет увеличить число каналов и, в конечном счете, общую пропускную способность системы без расширения диапазона рабочих частот. Рассматриваемая система, строго говоря, не может быть отнесена к системам с повышенной пропускной способностью, так как имеет коэффициент повторного использования частот 11/6, однако ее разработка является важным этапом по переходу к таким системам.

На рис. 4 представлена зона покрытия, формируемая полезной нагрузкой Ку-диапазона при нахождении КА в точке апогея.



Рис. 4. Зона покрытия полезной нагрузки Ку-диапазона из апогея

Fig. 4. Coverage area of the Ku-band payload from the apogee

Из рис. 4 видно, что покрытие заданной территории обеспечивается одиннадцатью лучами шириной $2,2^\circ$ при работе на основном (синий цвет) и на сопряженном (желтый цвет) витке орбиты.

Покрывание зоны обслуживания несколькими остронаправленными лучами вместо одного луча обеспечивает значительный выигрыш в коэффициенте усиления передающей антенны КА. Это позволяет существенно уменьшить размер антенны абонентского терминала.

Для реализации многолучевого покрытия выбран Ку-диапазон частот. Ослабление сигнала с частотой в 14 ГГц при прохождении через атмосферу показано на рис. 5 для всех возможных углов места на основном витке.

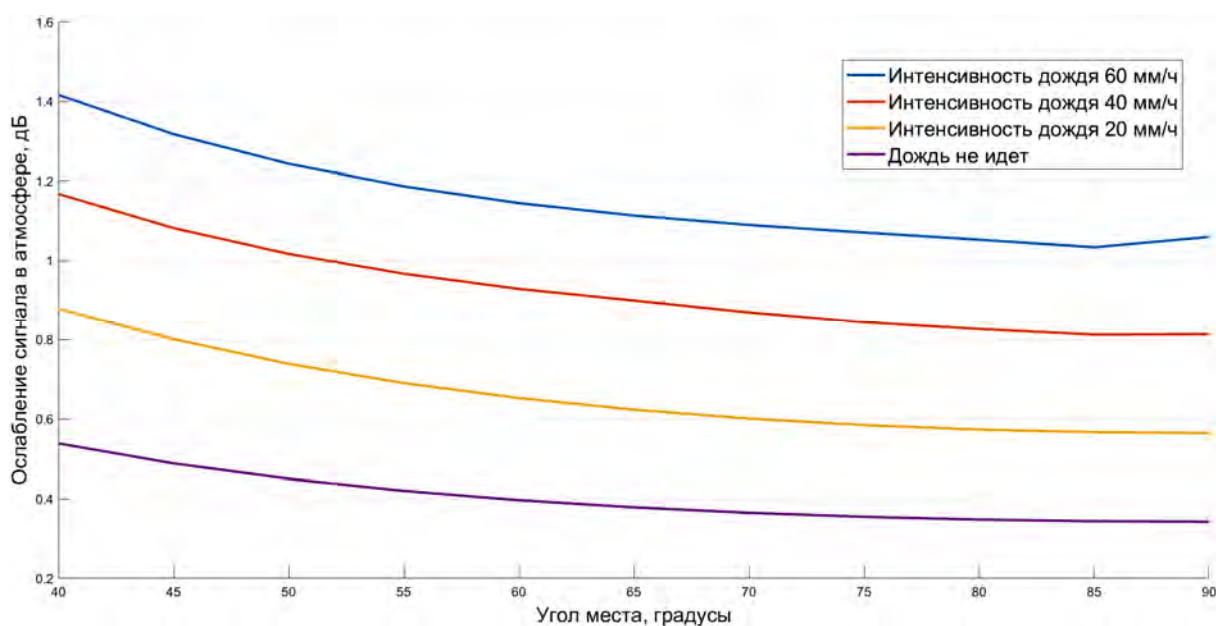


Рис. 5. Ослабление сигнала в атмосфере

Fig. 5. Signal attenuation in the atmosphere

Ослабление рассчитано в соответствии с рекомендациями международного союза электросвязи [8]. Суммарное ослабление сигнала состоит из ослабления в дожде, в облаках, на атмосферных газах и из-за тропосферных мерцаний. Вероятность превышения ослабления сигнала относительно используемого значения для каждого фактора затухания сигнала из рекомендации [8] принята равной 1 %. Из рис. 5 видно, что основной вклад в ослабление сигнала в Ку-диапазоне вносят осадки и даже при очень сильном дожде интенсивностью 60 мм/ч ослабление сигнала в атмосфере составляет немногим более 1,4 дБ.

Архитектура сети

Работа спутниковой системы основана на топологии «звезда», принцип действия которой поясняется на рис. 6.

В прямом канале спутниковой системы предусмотрено временное разделение абонентов (TDMA), при котором передача информации абонентам внутри каждого луча выполняется на одной несущей. Для реализации физического уровня модемного оборудования прямого канала выбран стандарт DVB-S2X. В обратном канале используется частотно-временное разделение абонентов (MF-TDMA). Обработка сигналов в обратном канале реализуется по стандарту DVB-RCS2. Возможность использования стандартов DVB-S2X и DVB-RCS2 в негеостационарных системах неоднократно обсуждалась [9–13]. Канальный уровень модемного оборудования реализуется по протоколам GSE и RLE в прямом и обратном канале соответственно. Символьная скорость в прямом и обратном канале составляет 0,7–54 и 0,1–8 Мсимв/с.

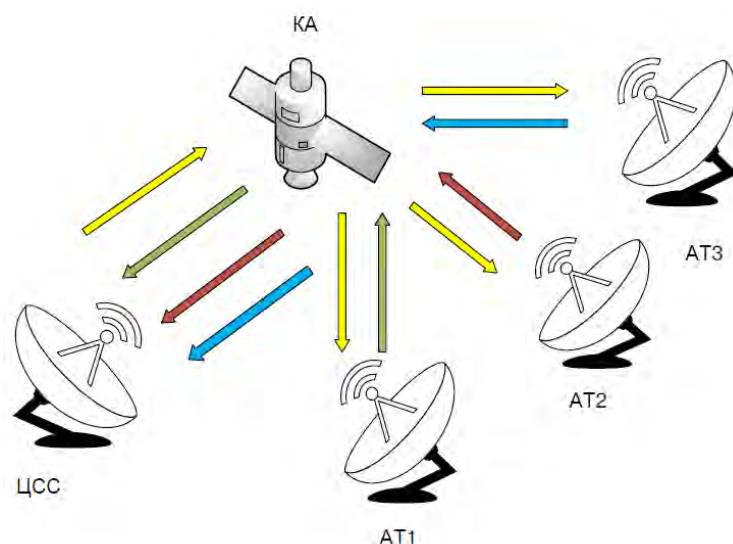


Рис. 6. Топология сети «звезда»

Fig. 6. Star network topology

Структура полезной нагрузки прямого и обратного канала

Полезная нагрузка Ку-диапазона включает одиннадцать прямых (без учета дополнительных) и одиннадцать обратных каналов, а также один радиомаяк, по сигналу которого отслеживается движение КА по орбите. Рассмотрим упрощенную схему прямых каналов полезной нагрузки Ку-диапазона, представленную на рис. 7.

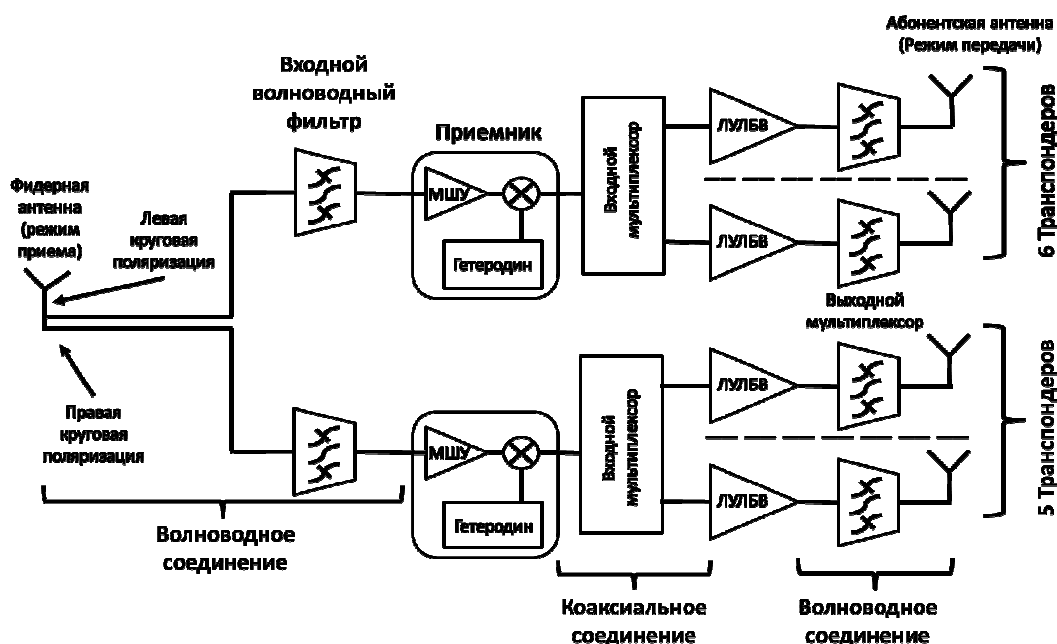


Рис. 7. Упрощенная функциональная схема прямых каналов полезной нагрузки Ку-диапазона

Fig. 7. Simplified functional diagram of Ku-band payload forward channels

На упрощенной функциональной схеме не показаны резервные элементы, обеспечивающие функционирование полезной нагрузки в случае отказа основных элементов, цепи их включения, дополнительные каналы, строящиеся на резервных элементах, и оборудование маяка.

Групповой сигнал, сформированный в модемном оборудовании, излучается антенной центра спутниковой связи. Излученный сигнал имеет левую и правую круговую поляризацию. Сигнал с ортогональными поляризациями регистрируется фидерной спутниковой антенной, функционирующей в режиме приема. Сигнал с выходных портов антенны пропускается через волноводный полосовой фильтр, предназначенный для фильтрации внеполосного излучения, и далее поступает на вход приемника. В приемнике обеспечивается предварительное усиление и однократное преобразование частоты сигнала, необходимое для изоляции нисходящей и восходящей линии.

Сигнал с выхода приемника поступает на входной мультиплексор, представляющий собой набор полосовых фильтров. Во входном мультиплексоре из всего диапазона частот выделяются каналы полосами 70 МГц, которые усиливаются в линеаризованном усилителе мощности на лампе бегущей волны (ЛУЛБВ). Для разделения соседних каналов предусмотрены защитные полосы шириной 16 МГц.

Усиленный сигнал пропускается через выходной фильтр. Фильтрация необходима для устранения паразитных эффектов, возникающих в усилителе высокой мощности и оказывающих на сигнал негативное влияние. Примером такого эффекта являются кратные гармоники в спектре сигнала, генерируемые нелинейными элементами. На заключительном этапе сигналы полосой 70 МГц излучаются антеннами с параболическим рефлектором в направлении заданных точек прицеливания.

Согласно требованиям, предусмотрено резервирование активного ретрансляционного оборудования, отказ которого ведет к потере функциональности транспондера: приемники, ЛУЛБВ, антенны и цепи их включения. Резервирование пассивного ретрансляционного оборудования (фильтры и мультиплексоры) не предусмотрено, так как его отказ маловероятен.

Для увеличения скорости передачи данных в трех транспондерах предусмотрены три дополнительных канала, работа которых основана на дополнительном приемнике и резервных ЛУЛБВ. Для объединения трех дополнительных каналов с тремя основными после выходного фильтра устанавливается выходной мультиплексор. Для управления подключением дополнительных каналов и отдельных резервных элементов в случае отказа основных используется кольцо резервирования, работа которого регулируется многопозиционными переключателями.

Далее рассмотрим упрощенную схему полезной нагрузки обратных каналов Ку-диапазона, представленную на рис. 8.

В обратных каналах абонентские терминалы, рассредоточенные по всей зоне покрытия из одиннадцати областей, излучают сигналы в направлении космического аппарата. Сигналы принимаются соответствующими одиннадцатью абонентскими антеннами на борту космического аппарата. Сигнал с выхода антенны пропускается через полосовой волноводный фильтр, в котором выделяется общий диапазон рабочих частот обратных каналов в восходящей линии и одновременно осуществляется фильтрация внеполосного излучения. Ширина полосы одного канала составляет 36 или 54 МГц.

Далее сигнал поступает на вход приемника, в котором выполняется усиление сигнала и однократное преобразование частоты. На следующем этапе преобразования в мультиплексоре пять или шесть соседних каналов объединяются в групповой сигнал. Результирующий сигнал усиливается при помощи линеаризованного усилителя высокой мощности.

Далее групповой сигнал пропускается через волноводный фильтр для устранения влияния негативных эффектов, возникающих при усилении: интермодуляционные продукты и кратные гармоники. На заключительном этапе сигналы с левой и правой круговой поляризацией поступают на порты фидерной антенны.

Аналогично прямым, в обратных каналах в случае отказа основного активного ретрансляционного оборудования предусмотрено его резервирование. Для управления подключением отдельных резервных элементов используется кольцо резервирования, работа которого основана на многопозиционных переключателях.

Высокоэллиптическая орбита характеризуется сильным доплеровским смещением. Поэтому исходные полосы частот оборудования полезной нагрузки расширены на величину максимального доплеровского сдвига в восходящих линиях прямых и обратных каналов. На рис. 9 показана временная зависимость доплеровского смещения на рабочем участке орбиты (для линии «вверх» и общего). Доплеровское смещение рассчитано для частот передачи 14 ГГц по линии «вверх» и 11 ГГц – «вниз».

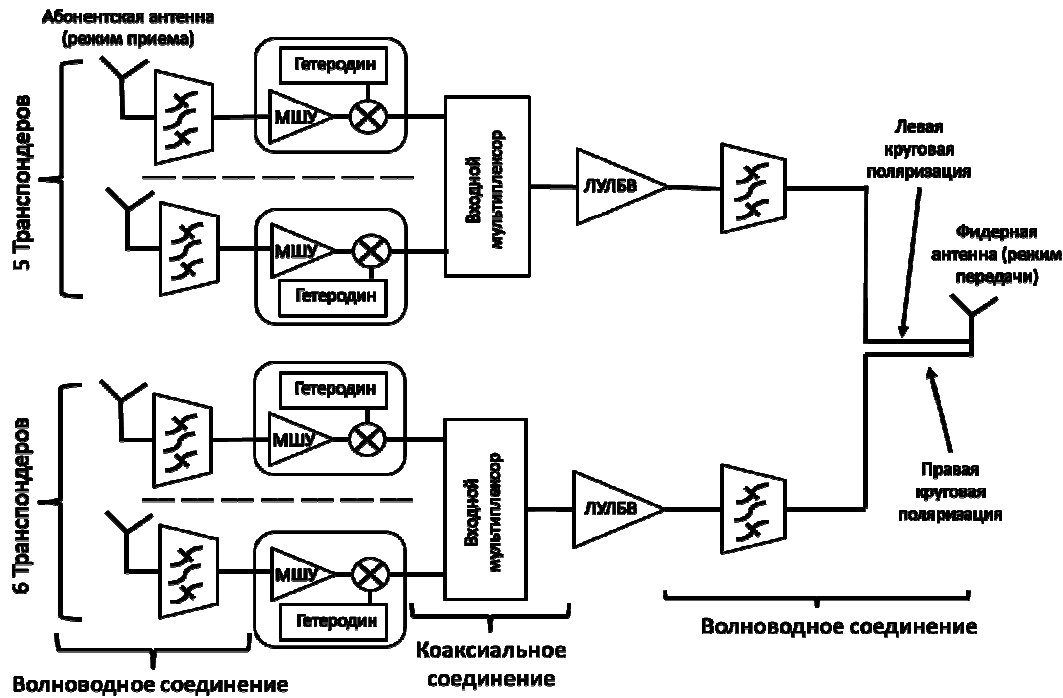


Рис. 8. Упрощенная функциональная схема обратных каналов полезной нагрузки Ku-диапазона

Fig. 8. Simplified functional diagram of Ku-band payload return channels

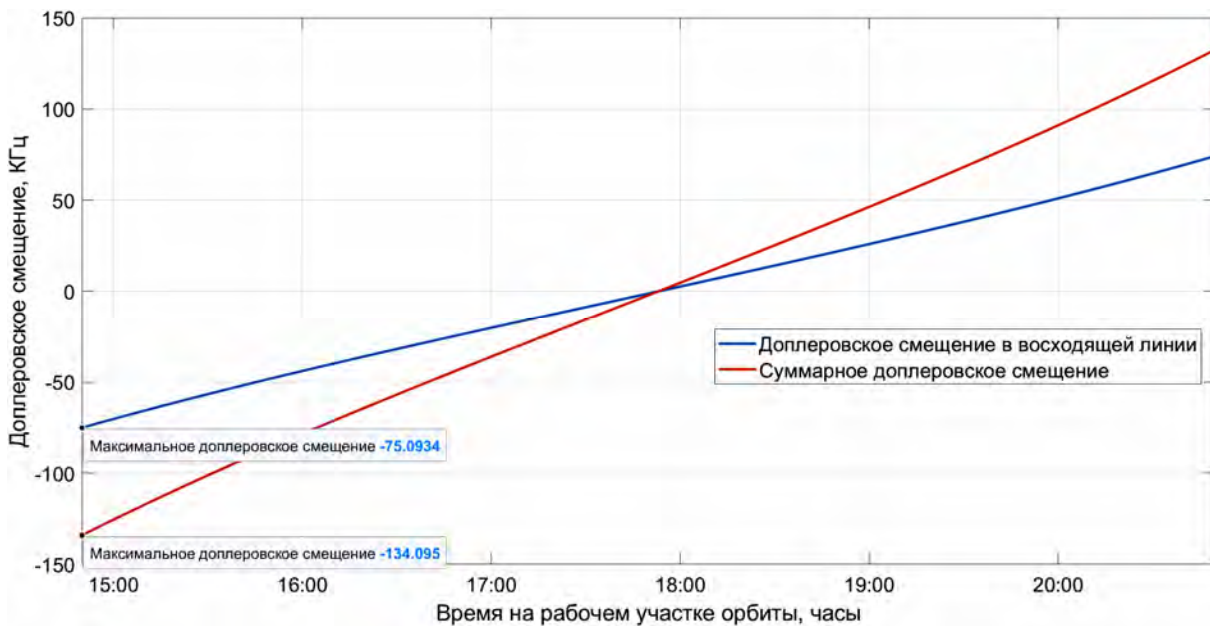


Рис. 9. Доплеровское смещение на линии «вверх» и суммарное доплеровское смещение

Fig. 9. Doppler shift on the uplink and total doppler shift

Оценка соотношения сигнал / шум в прямом канале

Прямая ретрансляция сигнала и большая длина радиотрассы накладывают жесткие ограничения на энергетический бюджет радиолинии, в особенности в обратном канале, поэтому далее приводится расчет отношения сигнал / шум в системе.

Расчет энергетического бюджета радиолинии произведен для точки апогея (наихудший случай) и для терминала абонента с диаметром параболического рефлектора равным 0,6, 0,9 и 1,2 м. Параметры расчета энергетического бюджета радиолинии в прямом канале представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры расчета энергетики радиолинии в прямом канале

	Параметр	Значение
Общие параметры	Интенсивность дождя, мм/ч	60
	Ширина полосы, МГц	70
	Фактор скругления	0,2
Восходящий канал	ЭИИМ антенны ЦСС, дБВт	67,1
	Частота, ГГц	13
	Ослабление свободного пространства, дБ	206,7
	Ослабление в атмосфере, дБ	0,96
Транспондер КА	Коэффициент усиления (КУ) приемной антенны КА, дБи	37,1
	Усиление сигнала до уровня мощности, Вт	150
	Шумовая температура транспондера КА, К	476,81
	Отношение сигнал/шум на стороне КА, дБ	19,91
	КУ передающей антенны КА, дБи	32,85
Нисходящий канал	Частота, ГГц	11
	Ослабление свободного пространства, дБ	205,5
	Ослабление в атмосфере, дБ	0,83
	Диаметр антенны абонента, м	0,6/0,9/1,2
	КПД антенны абонента	0,5
	Шумовая температура абонентского терминала, К	226
	Угол места, °	60
	Отношение сигнал/шум на стороне абонента, дБ	8,53/11,68/13,7
	E_s/N_0 , дБ	9,32/12,47/14,49
	G/T, дБ/К	9,92/13,06/15,08

Для расчета отношения сигнал / шум мощность сигнала, зарегистрированного антенной абонента, вычисляется как

$$P_{Sub} = EIRP_{GS} - FSPL_U - L_U^{Atm} + G_{Sat}^{Rx} + G_{Sat}^{Rep} + G_{Sat}^{Tx} - FSPL_D - L_D^{Atm} + G_{Sub}^{Rx} \text{ (дБВт)}, \quad (1)$$

где $EIRP_{GS}$ – ЭИИМ антенны ЦСС, $FSPL_U$ и $FSPL_D$ – ослабление сигнала в восходящей и нисходящей линии; L_U^{Atm} и L_D^{Atm} – ослабление в атмосфере; G_{Sat}^{Rx} и G_{Sat}^{Tx} – КУ приемной и передающей антенн КА; G_{Sub}^{Rx} – КУ антенны абонента; G_{Sat}^{Rep} – КУ при ретрансляции на борту КА.

При расчете энергетического бюджета радиолинии используется шумовая температура T^Σ , приведенная ко входу абонентского терминала:

$$T^\Sigma = T_{Sub} + T_{Sat} \cdot 10^{\frac{G_u}{10}}, \quad (2)$$

где T_{Sub} – шумовая температура абонентского терминала; T_{Sat} – шумовая температура КА; G_u – коэффициент приведения шумовой температуры, который вычисляется как

$$G_u = G_{Sat}^{Tx} + G_{Sat}^{Rep} - FSPL_D - L_D^{Atm} + G_{Sub}^{Rx} \text{ (дБ)}, \quad (3)$$

Отношение сигнал / шум SNR_{Sub} на стороне абонента рассчитывается следующим образом:

$$SNR_{Sub} = P_{Sub} - 10 \log_{10}(kBT^{\Sigma}), \quad (4)$$

где B – ширина полосы; k – постоянная Больцмана.

Отсюда отношение энергии символа к спектральной плотности шума равно [14]

$$\frac{E_S}{N_0} = SNR_{Sub} + 10 \log_{10}(1 + \alpha), \quad (5)$$

где α – фактор скругления формирующего фильтра; $\frac{E_S}{N_0}$ – отношение энергии символа к спектральной плотности шума.

Данные производительности стандарта DVB-S2X представлены в [14] для различных комбинаций кодовой скорости и вида модуляции (рассматриваются данные, соответствующие линейному режиму работы бортового усилителя). Результаты производительности соответствуют случаю идеальной синхронизации и отсутствию фазового шума. Таким образом, в [14] для каждого режима работы определена величина $\frac{E_S}{N_0}$, при которой достигается заданный уровень

вероятности пакетной ошибки $FER = 10^{-5}$ (квазибезошибочный прием).

Рассчитанные значения $\frac{E_S}{N_0}$ позволяют работать с типами модуляции BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK без ограничений. Для абонентского терминала с антенной диаметром 0,6 м для нескольких кодовых скоростей в режимах с модуляцией 16APSK величина $\frac{E_S}{N_0}$ в стандарте превышает расчетное значение и не обеспечивает целевую величину пакетной ошибки из стандарта. Например, согласно стандарту, в режиме работы с модуляцией 16APSK и кодовой скоростью 13/18 для нормального кадра квазибезошибочный прием обеспечивается при $\frac{E_S}{N_0} = 9,71$ дБ.

Необходимо заметить, по стандарту DVB-S2X передача сигнала абонентам внутри каждого луча выполняется на одной несущей (временное разделение абонентов, TDMA). Для работы каждому абоненту выделяется временной слот радиокadra, формируемого в соответствии с определенным режимом передачи. Поскольку режим передачи в пределах одного радиокadra остается постоянным, то он будет выбираться по абоненту, находящемуся в наиболее неблагоприятных условиях связи, т. е. имеющему наименьшую величину $\frac{E_S}{N_0}$. Это нивелирует выгоду

от использования антенн с различным диаметром апертуры в прямом канале и является серьезной неэффективностью всей системы.

Одним из преимуществ DVB-S2X по сравнению с DVB-S2 являются расширенные возможности в области высоких значений отношения сигнал / шум [15; 16]. Так, при отношении сигнал / шум равном 20 дБ алгоритмы расширенной версии стандарта (DVB-S2X) дают выигрыш спектральной эффективности 51 % по сравнению с DVB-S2. Оценка отношения сигнал / шум показала, что значительная часть улучшений алгоритмов расширенной версии стандарта (DVB-S2X) оказывается неиспользованной в рассматриваемом наихудшем сценарии связи, что является еще одним недостатком системы. С другой стороны, базовый сценарий работы системы будет характеризоваться несколько большим отношением сигнал / шум, чем наихудший.

Оценка соотношения сигнал / шум в обратном канале

Аналогично рассчитывается отношение сигнал / шум в обратном канале. Параметры расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры расчета энергетики радиолинии в обратном канале

	Параметр	Значение
Общие параметры	Интенсивность дождя, мм/ч	60
	Ширина полосы, МГц	2,4
	Фактор скругления	0,2
Восходящий канал	ЭИИМ антенны абонента, дБВт	44/47,5/50
	Частота, ГГц	14
	Ослабление свободного пространства, дБ	208
	Ослабление в атмосфере, дБ	1,14
Транспондер КА	КУ приемной антенны КА, дБи	33,15
	Усиление сигнала до уровня мощности, Вт	150
	Шумовая температура транспондера КА, К	478,5
	Отношение сигнал / шум на стороне КА, дБ	6,01/9,51/12,01
	КУ передающей антенны КА, дБи	35,97
Нисходящий канал	Частота, ГГц	11
	Ослабление свободного пространства, дБ	205,5
	Ослабление в атмосфере, дБ	0,64
	Диаметр антенны ЦСС, м	7,5
	КПД антенны ЦСС	0,8
	Шумовая температура ЦСС, К	179
	Угол места, °	60
	Отношение сигнал / шум, дБ	6,01/9,51/12,01
	E_s/N_0 , дБ	6,8/10,3/12,8

Данные о производительности стандарта DVB-RCS2 представлены в спецификации [17]. Рассчитанные значения $\frac{E_s}{N_0}$ позволяют абоненту с антенной диаметром 0,6 м работать в режимах с QPSK- и BPSK-модуляцией, однако для поддержки других типов модуляции величина $\frac{E_s}{N_0}$ оказывается недостаточной. Несколько большая принимаемая мощность абонентом с антенной диаметром 0,9 м позволяет обеспечить работу с частью режимов с модуляцией 8PSK, 1,2 м – задействовать часть режимов с модуляцией 16QAM. Таким образом, подтверждена возможность работы системы связи в обратном канале, однако отсутствие возможности работы в области высоких значений $\frac{E_s}{N_0}$ является недостатком, ограничивающим максимальную символьную скорость в обратном канале.

Заключение

В работе рассмотрена спутниковая система «Экспресс-РВ», являющаяся первым шагом в разработке систем HTS в России. Ключевой особенностью является многолучевая полезная нагрузка Ku-диапазона, предназначенная для покрытия зоны обслуживания остроуправляемыми лучами, поэтому она рассмотрена наиболее подробно.

Произведен расчет энергетического бюджета радиолинии в прямом и обратном канале, позволивший оценить отношение $\frac{E_s}{N_0}$ в системе связи. По результатам оценки сделан вывод о работоспособности системы. Для обратного канала для 3 типов абонентских терминалов определены виды модуляции из стандарта DVB-RCS2, которые будут фактически использоваться в системе. Для прямого канала установлено, что режим передачи выбирается по абоненту, находящемуся в наиболее неблагоприятных условиях связи (в наихудшем случае величина $\frac{E_s}{N_0}$

равна 9,32 дБ). Следовательно, выигрыш от использования антенн с большим диаметром апертуры отсутствует, что говорит о серьезной неэффективности. Кроме того, весовые возможности DVB-S2X по работе в области высоких значений отношения $\frac{E_s}{N_0}$ оказываются не задействованными.

Библиографические ссылки

1. A survey on nongeostationary satellite systems: The communication perspective / H. Al-Hraishawi et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 25 (1). P. 101–132.
2. Danish M. N., Pasha S. A. Satellite Communication: State-of-the-Art and Future Challenges. 2023 [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Danish-19/publication/371503006_Satellite_Communication_State-of-the-Art_and_Future_Challenges/links/6487521579a72237652bfb2b/Satellite-Communication-State-of-the-Art-and-Future-Challenges.pdf (дата обращения: 20.01.2025).
3. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges / O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 23(1). P. 70–109.
4. Локшин Б. «Экспресс-РВ» – перспективная система связи со спутниками на высокоэллиптических орбитах // Технологии и средства связи. 2018. № S1. С. 62–71.
5. Сомов А. М., Корнев С. Ф. Спутниковые системы связи. М. : Горячая линия – Телеком, 2012. 244 с.
6. Maral G., Bousquet M., Sun Z. Satellite communications systems: systems, techniques and technology. Hoboken : John Wiley & Sons Ltd., 2020. 766 p.
7. Minoli D. Innovations in satellite communications and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Hoboken : John Wiley & Sons Ltd., 2015. 448 p.
8. Series P. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Recommendation ITU-R. 2015. P. 618–12.
9. Kim P., Park H. Robust Symbol Timing Synchronization for Initial Access under LEO Satellite Channel // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 19. P. 8320.
10. Low complexity DVB-S2X frequency synchronization for LEO satellites / K. Iansitov et al. // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). IEEE, 2021. P. 1–5.
11. DVB Bluebook C107 (July 2023). Commercial Requirements for the use of DVB-RCS2 in Geostationary and Non-Geostationary Systems [Электронный ресурс]. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2023/07/C107_Commercial-Requirements-for-the-use-of-DVB-RCS2-in-Geostationary-and-Non-Geostationary-Systems.pdf (дата обращения: 16.01.2025).
12. DVB STANDARD SUPPORT OF NGSO SYSTEMS. 2025 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.satixfy.com/wp-content/uploads/2024/11/DVB-Support-for-NGSO.pdf> (дата обращения 20.02.2025).
13. Сравнительный анализ точности алгоритмов частотной синхронизации для системы спутниковой связи на основе сигнала DVB-S2 / С. А. Левичев, К. К. Янситов, С. В. Дорохин, А. В. Дворкович // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.23>.
14. DVB BlueBook A083-2r4 (Draft EN 302 307-2 V1.4.1) (2024-02): Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X).
15. DVB Document A172 (03/2015). White Paper on the use of DVB-S2X for DTH applications, DSNG & Professional Services, Broadband Interactive Services and VL-SNR applications [Электронный ресурс]. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a172_dvb-s2x_highlights_-_white_paper.pdf (дата обращения 21.01.2025).

16. Kolomensky K. Yu., Demidova A. Yu., Kazarinov A. S. From DVB-S to DVB-S2X: Progress in Standardization of Digital Satellite Broadcasting Systems // *Journal of the Russian Universities*. 1998. Vol. 27, No. 2. P. 69.

17. ETSI T. R. 101 545-4 V1. 1.1 (2014-04) Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB. Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545. Vol. 2.

References

1. Al-Hraishawi, Hayder et al. A survey on nongeostationary satellite systems: The communication perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022, Vol. 25, No. 1, P. 101–132.

2. Muhammad N., Danish M., Syed A., Pasha. Satellite Communication: State-of-the-Art and Future Challenges, 2023. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Danish-19/publication/371503006_Satellite_Communication_State-of-the-Art_and_Future_Challenges/links/6487521579a72237652bfb2b/Satellite-Communication-State-of-the-Art-and-Future-Challenges.pdf (accessed: 20.01.2025).

3. Kodheli O. et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020, Vol. 23, No. 1, P. 70–109.

4. Lokshin B. [“Express-RV” as a forward-looking communications system with satellites in highly elliptical orbits]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2018, No. S1, P. 62–71 (In Russ.).

5. Somov A. M., Kornev S. F. Sputnikovye sistemy svyazi. Goryachaya liniya–Telekom, 2012. Moscow Goryachaya liniya Telekom, 2012, 244 p.

6. Maral G., Michel B., Zhili S. Satellite communications systems: systems, techniques and technology. Khoboken, John Wiley & Sons Ltd., 2020, 766 p.

7. Minoli D. Innovations in satellite communications and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Khoboken, John Wiley & Sons Ltd., 2015, 448 p.

8. Series P. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Recommendation ITU-R. 2015. P. 618–12.

9. Kim P., Park H. Robust Symbol Timing Synchronization for Initial Access under LEO Satellite Channel. *Sensors*. 2023, Vol. 23, No. 19, P. 8320.

10. Iansitov K. et al. Low complexity DVB-S2X frequency synchronization for LEO satellites. *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. IEEE, 2021, P. 1–5.

11. DVB Bluebook C107. Commercial Requirements for the use of DVB-RCS2 in Geostationary and Non-Geostationary Systems. July 2023. Available at: https://dvb.org/wp-content/uploads/2023/07/C107_Commercial-Requirements-for-the-use-of-DVB-RCS2-in-Geostationary-and-Non-Geostationary-Systems.pdf (accessed 16.01.2025).

12. Freedman A. et al. DVB standard support of ngso systems. 2025. Available at: <https://www.satixfy.com/wp-content/uploads/2024/11/DVB-Support-for-NGSO.pdf> (accessed: 20.02.2025).

13. Levichev S. A., Iansitov K. K., Dorokhin S. V., Dvorkovich A. V. Comparative analysis of accuracy of frequency synchronization algorithms for satellite communication system based on DVB-S2 signal. *Journal of Radio Electronics*. 2023, Vol. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.23> (In Russ.).

14. DVB BlueBook A083-2r4. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). February 2024.

15. DVB Document A172. White Paper on the use of DVB-S2X for DTH applications, DSNG & Professional Services, Broadband Interactive Services and VL-SNR applications. March 2015. Available at: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a172_dvb-s2x_highlights_-_white_paper.pdf (accessed: 21.01.2025).

16. Kolomensky K. Yu., Demidova A. Yu., Kazarinov A. S. From DVB-S to DVB-S2X: Progress in Standardization of Digital Satellite Broadcasting Systems. *Journal of the Russian Universities*. 1998, Vol. 27, No. 2, P. 69.

17. ETSI TR 101 545-4 V1.1.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545. April 2014.

© Жаринов В. Ф., Пономарев О. Г., Бобков И. В. 2025

Жаринов Вячеслав Федорович – аспирант, Томский государственный университет; инженер, АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: jarinov.slava@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0000-8472-7159>.

Пonomarev Олег Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, доцент; Томский государственный университет. E-mail: oleg.ponomarev@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9872-9902>.

Бобков Игорь Вячеславович – инженер, АО «РЕШЕТНЁВ».

Zharinov Vyacheslav Fedorovich – Postgraduate student, Tomsk State University; engineer, JSC “Reshetnev”. E-mail: jarinov.slava@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0000-8472-7159>.

Ponomarev Oleg Gennadievich – Ph.D., Associate Professor; Tomsk State University. E-mail: oleg.ponomarev@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9872-9902>.

Bobkov Igor Vyacheslavovich – Engineer, JSC “Reshetnev”.

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; принята к публикации 19.05.2025; опубликована 30.06.2025

The article was submitted 16.04.2025; accepted for publication 19.05.2025; published 30.06.2025

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License