

УДК 621.391.6

СИСТЕМА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ МАЛОГО СПУТНИКА

Х.И. АБДУЛЛАЕВ*, Р.А. ГАСАНОВ*, Б.Э. ГУСЕЙН-ЗАДЕ*

В статье проведён обзорный анализ известных модулей радиосвязи S-диапазона (12 наименований от 7 производителей) для телекоммуникационной системы низкоорбитального (1000 км) малого спутника (МС). Составлена структурная схема одного из возможных вариантов построения системы телекоммуникации и обсуждены основные характеристики ее периферийных блоков. Проведен расчет бюджета радиолинии «спутник-Земля», предложенной для МС системы телекоммуникации S-диапазона, и определены общие требования к характеристикам ее наземного сегмента.

Ключевые слова: радиосвязь, спутник связи, малый спутник, телекоммуникационный спутник S-диапазона, бюджет радиолинии.

Малый спутник (МС) применяется ныне для решения целого спектра прикладных и научных задач: исследование атмосферы Земли, космического мусора, космоса; испытание новейших технологий, моделей и методов для научных исследований в различных областях, в том числе в области дистанционного зондирования; обеспечение связи, навигации; выполнение специальных задач контроля и наблюдения и т.д. [1]. Следует отметить высокий потенциал применения МС и в образовательных программах в крупных учебных заведениях по проектированию и запуску МС, а также в рамках деятельности групп и организаций, объединяющих энтузиастов спутниковой связи.

Причиной бурного развития технологий МС и расширения сферы их применения является относительно низкая стоимость их изготовления и эксплуатации. Кроме того, МС легко модифицируются для решения определённой задачи и могут обеспечивать значительное увеличение оперативности получения потребителем данных наблюдения за счёт создания необходимой по численности группировки малых аппаратов. Применение МС способствует уменьшению рисков, связанных с запуском на орбиту и работой в космосе, снижая финансовые потери в случае отказа или утраты такого спутника. Традиционно МС подразделяются на 5 классов (табл.1) [2].

* Азербайджанская Национальная академия авиации
E-mail: khagani61@gmail.com

Базовый модуль бортовых систем МС (без учёта полезной нагрузки) состоит из системы энергоснабжения; системы угловой ориентации и стабилизации; системы связи; системы управления, сбора и обработки данных [3].

Повышенная сложность бортовых систем МС, экстремальные условия эксплуатации и высокая вероятность потери спутника требуют постоянного контроля состояния бортовых систем. Высокие требования к обеспечению устойчивой связи и передачи данных полезной нагрузки, телеметрии и командных сигналов подтверждают, что разработка надежной системы телекоммуникации для МС является актуальной задачей.

Основным элементом любой бортовой телекоммуникационной системы является приёмно-передающий модуль. На сегодняшний день на рынке имеются несколько поставщиков космической технологии, такие как COM DEV EUROPE, IQ wireless GmbH, ECM space technologies, L3 Technologies, MEISEI, Thales Alenia Space, DST и т.д. Поставляемые этими производителями телекоммуникационные модули, а также их основные характеристики приведены в табл. 2.

Все перечисленные модули могут быть использованы для организации двусторонней радиосвязи в S-диапазоне. Исключением является модуль MSX-765, в котором «downlink» канал организуется в L-диапазоне, а «uplink» канал – в S-диапазоне. При выборе того или иного модуля следует также учитывать такой немаловажный фактор как доступность подробной информации о внутренней структуре. Необходимыми и достаточными особенностями для построения бортовой телекоммуникационной системы низкоорбитальной МС обладают модули STC-MS01 (рис.1) и STC-MS03 (рис.2). Основные характеристики обоих модулей приведены в работах [4, 5].



Рис. 1. Модуль STC-MS01

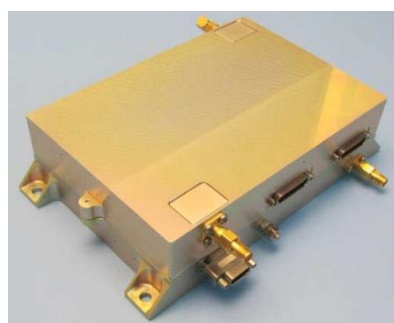


Рис. 2. Модуль STC-MS03

Один из возможных вариантов построения телекоммуникационной системы на основе выбранного радиомодуля изображен на рис.3. Приёмный тракт системы состоит из двух идентичных приёмных антенн, объединителя и приёмника трансивера. Передающий тракт, в свою очередь, состоит из передатчика трансивера, разъединительного блока, двух диодных переключателей и двух идентичных передающих антенн.

Табл. 1

Классификация МС

Классы МС	Диапазон масс
Фемтоспутник	10 – 100 г
Пикоспутник	< 1 кг
Наноспутник	1 – 10 кг
Микроспутник	10 – 100 кг
МС верхнего массового диапазона	100 – 500 кг

Табл.2.

Телекоммуникационные модули и их основные характеристики									
Наименование фирмы (страна производитель)	Наименование модуля	Продолжительность миссии (лет)	Вес (кг)	Размеры (мм)	Модуль Rx		Модуль Tx		
					Скорость передачи данных	Энергопотребление (Вт)	Скорость передачи данных	Энергопотребление (Вт)	Выходная мощность (Вт)
COM DEV EUROPE (United Kingdom)	STC-MS01	3-5	0,78	145x110x50	1) 0,5 / 1 / 2 kbps 2) 1 / 2 / 4 kbps 3) 64...1024 kbps	4	1) 64...1024 kbps 2) 1...6,25 Mbps	14	1) 2 2) 5
COM DEV EUROPE (United Kingdom)	STC-MS03	7	1	160x110x44	1) 0,5 / 1 / 2 kbps 2) 1 / 2 / 4 kbps 3) 64...1024 kbps	4	1) 64...1024 kbps 2) 1...6,25 Mbps	26	1) 0,2 2) 5
IQ wireless GmbH (Germany)	SLINK	2	0,42	65x65x137	30...200 kbps	4,5	0,6...4 Mbps	8...12	0,5
ECM space technologies GmbH (Germany)	SLINK-Phy	2	0,19	50x55x94	256 kbps	4	20 Mbps	8...12	0,5
L3 Technologies (USA)	MSX-765 *	15	2,46	184x91x93	1) 4 kbps 2) 64 kbps...2 Mbps	8	2...10 Mbps	35	5
L3 Technologies (USA)	CXS-610	15	2,4	140x224x79	1) 4 kbps 2) 2 kbps 3) 1 kbps 4) 0,5 kbps	5,5	1) 4 kbps 2) 2 kbps 3) 1 kbps 4) 0,5 kbps	35	5
L3 Technologies (USA)	CXS-2000/C**	15	3,5	178x153x102	1) 4 kbps 2) 2 kbps 3) 1 kbps	16	1) 4 kbps 2) 2 kbps 3) 1 kbps	40	5
L3 Technologies (USA)	CXS-1000	5	1,03	102x115x102	1) 250 kbps 2) 1 Mbps	5	20 Mbps	25	10
MEISEI (Japan)	Transceiver for Spacecraft	5	1,65	198x120x39	4 kbps	2,5	1) 16 kbps 2) 1Mbps	1) 3,5 2) 15	1) 0,01 2) 0,5
Thales Alenia Space (France)	Integrated S-Band Transponder (ISBT)	15	2,6	228x170x194	1) 4 kbps 2) 64 kbps 3) 300 kbps 4) 2 Mbps	5	1) 50 kbps 2) 250 kbps 3) 300 kbps 4) 8 Mbps	25	5
Thales Alenia Space (France)	TDRSS Compatible S-Band Transponder	15	4	300x198x110	1) 250 bps 2) 500 bps 3) 1 kbps 4) 2 kbps	7	0,1...256 kbps	1) 7 2) 25	1) 0,4 2) 5
DST (Japan)	DSTRX-1	3-5	0,74	120x80x47	4 kbps	1,2	4... 64 kbps	4,3 Вт	0,2...0,4 Вт

* используется L-диапазон для приёма, S-диапазон для передачи.

** есть возможность работы приёмника в L- и S- диапазонах.

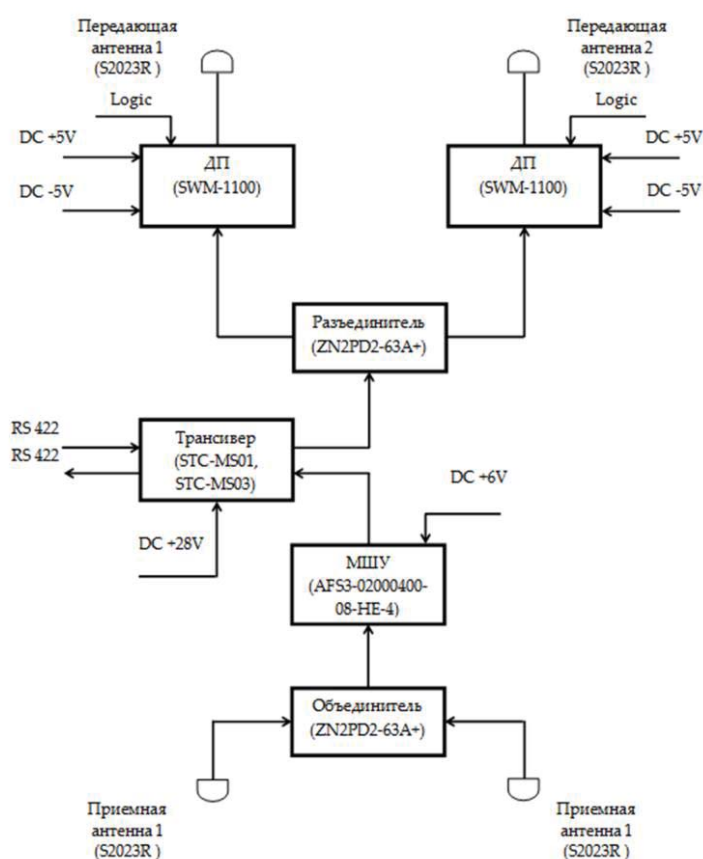


Рис. 3. Структурная схема телекоммуникационной системы S-диапазона для МС

облучателя – 60 мм, диаметр рефлектора – 100 мм, вес – 120 г) марки S2023R (SystemTechnik GmbH, Германия) (рис.4). Обеспечивающая полусферическое покрытие антенна изначально была разработана для использования на МС. Для достижения сферического охвата S2023R применяется в паре с антенной, расположенной на противоположной стороне корпуса спутника. Форма ДН оптимизирована, особенно для полетов на низкой околоземной орбите (LEO) с ориентацией NADIR. Антенна работает на частотах S-диапазона. Коэффициент усиления составляет 3dBic. Для «downlink» канала выделен диапазон частот 2200-2290 МГц, а для «uplink» канала – 2025-2110 МГц. Диапазон рабочих температур составляет -60÷+120°C [6].

Подключение антенны к общему приёмному тракту трансивера возможно применением объединительного блока ZN2PD2-63A+ (рис.5).

Устройство является обратимым, т.е. используется как в качестве объединителя в приёмном тракте, так и в качестве разъединителя в передающем тракте. Устройство работает в полосе частот от 350 до 6000 МГц. Диапазон рабочих температур состав-

В проектируемом МС будут использованы четыре антенны – две на передачу и две на прием, с диаграммой направленности (ДН) в виде полусферы. Расположения антенн выбираются таким образом, что, независимо от пространственного положения МС, одна пара антенн (приёмная и передающая) будет находиться в зоне радиовидимости земной станции. Такой подход решает проблему использования сложной системы ориентации спутника. При этом необходимо учитывать, что вся внешняя поверхность МС по возможности должна быть покрыта солнечными панелями. Из-за малых размеров МС такой подход вполне реализуем и уже апробирован в таких проектах как MIDSTAR-1, SNOE и т.д.

В проектируемой системе телекоммуникации применена малогабаритная антенна (диаметр



Рис. 4. Антенна S2023R



Рис. 5. Объединительный/разделительный блок ZN2PD2-63A+

ляет $-55^{\circ}+100^{\circ}\text{C}$. Устройство надежно работает при входной мощности до 25 Вт в качестве разъединителя и до 1 Вт в качестве объединителя. Вносимые потери не превышают 0,9 дБ [7]. Поставляется в двух комплектациях: с SMA (ZN2PD2-63A-S+) и N-типа (ZN2PD2-63A-N+) разъемами.

Данные с выхода объединительного блока поступают на вход малошумящего усилителя марки AFS3-02000400-08-HE-4 (L3 Narda-MITEQ, США) (рис.6). Диапазон рабочих частот устройства составляет 2-4 ГГц, напряжение питания – 6 В, потребление тока – 40 мА, минимальный коэффициент усиления составляет 34 дБ, динамический диапазон – 80 дБ, коэффициент шума – 0,8 дБ [8].



Рис. 6. МШУ AFS3-02000400-08-HE-4

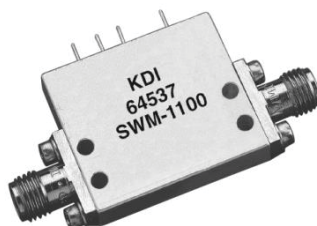


Рис. 7. ДП SWM-1100

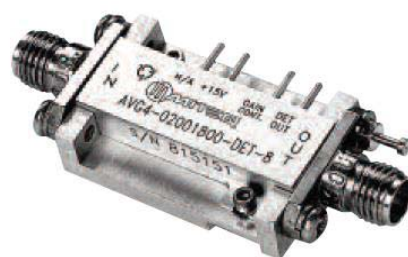


Рис. 8. Усилитель мощности AVG4-00101200-DET-8

Представленная система телекоммуникации предусматривает применение двух диодных переключателей (ДП), работающих на две разнесенные передающие антенны. В качестве ДП используется устройство марки SWM-1100 (Aeroflex, США) (рис.7) [9]. Устройство представляет собой PIN-диодный переключатель, работающий в диапазоне частот 0,5-18 ГГц. Коммутация к антенне происходит путем подачи логического «0» от бортового компьютера на вывод «Logic» (см. рис.3).

При необходимости увеличения излучаемой мощности можно применить усилитель мощности (УМ) марки AVG4-00101200-DET-8 (L3 Narda-MITEQ, США) (рис.8), который обеспечивает усиление в диапазоне частот от 100 МГц до 12 ГГц. Коэффициент усиления составляет 26 дБ, напряжение питания – 15 В, а ток потребления – 185 мА. Указанный УМ позволяет проводить постоянный мониторинг выходной мощности. Для этой цели в схеме предусмотрен высокочастотный диодный детектор. Напряжение на входе диодного детектора может принимать значения в интервале от 0 до 600 мВ. Информация о выходной мощности поступает на бортовой компьютер МС, где, в свою очередь, формируется управляющее напряжение, регулирующее коэффициент усиления УМ, и подается на соответствующий вход усилителя. Диапазон изменения управляющего напряжения составляет от 0 до 15 дБ [10].

Согласование с наземным сегментом. Авторы рассматривали вопросы, связанные с построением орбитального сегмента телекоммуникационной системы, что предопределяет необходимость формирования требований к характеристикам наземного сегмента.

В спутниковых системах с аналоговой модуляцией одной из основных характеристик качества приема является отношение сигнал/помеха (S/N Ratio). В цифровых спутниковых системах для указанной цели используется коэффициент битовых ошибок (BER- Bit Error Rate), который равен отношению числа ошибочно принятых битов (символов) к общему числу битов измеряемого сигнала в заданном интервале времени. Несмотря на это, общей

характеристикой качества связи для обоих классов систем является отношение «несущая/шум (C/N Ratio)», также называемое «бюджетом радиолинии». Следовательно, для анализа качества приема необходимо определить мощности несущей (C) и шумов (N) в пункте приема.

Наличие на трассе распространения радиоволн атмосферы Земли приводит к ослаблению сигнала. Затухание в невозмущенной атмосфере обусловлено в основном поглощениями в кислороде, водяных парах и ионосфере. На частотах выше 0,2 ГГц ионосферные потери становятся весьма малыми, и их можно не учитывать [11]. Также можно пренебречь ослаблениями в облаках на частотах ниже 10 ГГц [12]. С учетом вышеизложенного, мощность несущей на входе приемника, который находится на расстоянии d от МС, может быть определена соотношением:

$$C = \frac{G_{\text{ПРД.А}} P_{\text{ПРД}} r_A^2 \eta}{4d^2 L}, \quad (1)$$

где $G_{\text{ПРД.А}}$ - коэффициент усиления бортовой передающей антенны, $P_{\text{ПРД}}$ - мощность на выходе передатчика (или УМ) МС, r_A - радиус апертуры приемной антенны, η - коэффициент использования апертуры, L - потери в кислороде и водяных парах. В ориентировочных расчетах можно принимать: $r_A = 4,5 \text{ м}$ и $\eta = 0,8$.

Для расчета суммарных потерь в атмосфере в работе [11] предлагается формула:

$$L[\text{дБ}] = \frac{h_K L'_K + h_B L'_B}{\sin \gamma}, \quad (2)$$

где h_K и h_B - эквивалентная высота слоя кислорода и водяного пара соответственно, L'_K и L'_B - удельное поглощение (дБ/км) кислородом и водяным паром соответственно, γ - угол места антенны земной станции. Эквивалентную высоту кислородного слоя в невозмущенной среде можно считать равной 6 км. Эквивалентная высота водяного пара может быть определена по следующей эмпирической формуле [11]:

$$h_B = \left[2,2 + \frac{3}{(f - 22,3)^2 + 3} + \frac{1}{(f - 183,3)^2 + 1} + \frac{1}{(f - 323,8)^2 + 1} \right] [\text{км}], \quad (3)$$

где f - центральная частота диапазона в ГГц.

Графики зависимостей удельных поглощений кислородом и водяным паром от частоты приведены на рис.9 [11].

Из графиков рис. 9 следует, что на центральной частоте исследуемого диапазона $L'_K \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}$ и $L'_B \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ дБ/км}$. Учитывая данные из графиков на рис.9, на основе формул (1), (2) и (3) можно вычислить мощность несущей на входе приемника, которая для синтезированной системы телекоммуникации S-диапазона составляет $C = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$. В расчетах угол подъема

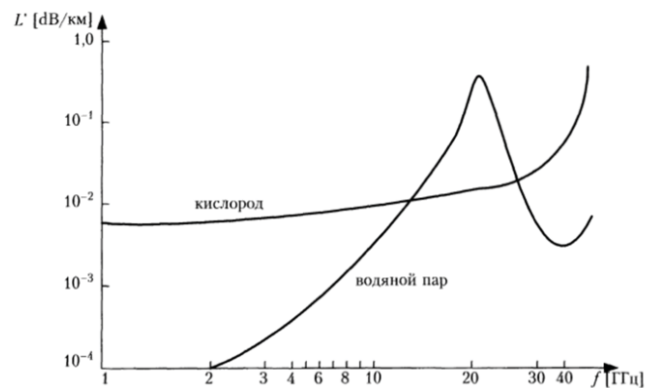


Рис. 9. Графики зависимостей удельных поглощений кислородом и водяным паром от частоты

антенны наземной станции принят равным $\gamma = 10^0$ (наихудший случай).

Суммарную мощность шумов можно определить по формуле:

$$N = kT_{\Sigma}B, \quad (4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вм} / \text{Гц} \cdot \text{К}$ - постоянная Больцмана, T_{Σ} - суммарная шумовая температура, B - ширина полосы принимаемого радиосигнала. В свою очередь, суммарная шумовая температура зависит от шумовой температуры антенны (T_A), потерь в фидере (L_{Φ}), а также шумовой температуры малошумящего усилителя (МШУ) ($T_{\text{МШУ}}$) и определяется как [11]:

$$T_{\Sigma} = \frac{T_A}{L_{\Phi}} + 290 \left(\frac{L_{\Phi} - 1}{L_{\Phi}} \right) + T_{\text{МШУ}}. \quad (5)$$

Как было указано ранее, S-диапазон мало подвержен влиянию облачности. Поэтому расчет шумовой температуры антенны проведен в условиях ясного неба по формуле [13]:

$$T_A = 15 + \frac{15}{r_A} + \frac{180}{\gamma}, \quad (6)$$

Примем, что потери в фидере не превышают 1,3 раза (т.е. $L_{\Phi} = 1,3$ (1дБ)). Между шумовой температурой МШУ и коэффициентом шума ($N_{\text{ш}}$) существует однозначная связь [11]:

$$T_{\text{МШУ}} = 290(N_{\text{ш}} - 1). \quad (7)$$

Учитывая, что в диапазонах L – Ка коэффициент шума находится в пределах (0,15–1,5) дБ, примем $N_{\text{ш}} = 1,4$ (1,5дБ). Подставив в выражения (4) - (7) выбранные значения параметров, определим суммарную мощность шумов: $N = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$. Таким образом, выбранные узлы орбитального сегмента системы телекоммуникации S-диапазона обеспечивают на входе приемника наземной станции отношение «несущая/шум», равное 57 (18дБ), при угле подъема антенны 10° .

Заключение. Предлагаемые различными производителями модули радиосвязи S-диапазона позволяют модифицировать телекоммуникационную систему МС любого типа. Путем сравнительного анализа известных моделей установлено, что модули марки STC-MS01 и STC-MS03 обладают лучшими характеристиками в контексте синтеза системы телекоммуникации S-диапазона для низкоорбитального МС, высотой 1000 км. Структурный и численный анализ синтезированной системы телекоммуникации показал, что указанные модули могут обеспечивать бюджет радиолинии «спутник - Земля» величиной 18дБ при угле подъема наземной антенны в 10° . Такое значение бюджета радиолинии легко поддерживается известными модулями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики - Грант EIF-KETPL-2-2015-1(25)-56/16/1.

REFERENCES

1. Fateev V.F. *Malye kosmicheskie apparaty informacionnogo obespecheniya*. – М.: Radioelektronika, 2010, 320 s.
Фатеев В.Ф. *Малые космические аппараты информационного обеспечения*. – М.: Радиоэлектроника, 2010, 320 с.
2. Rajson D. *Malye sputniki v sovremennoj kosmicheskoy dejatel'nosti* // Sputnikovaya svyaz i veshhanie, 2017, №6, s.64-69.
Пайсон Д. *Малые спутники в современной космической деятельности* // Спутниковая связь и вещание, 2017, №6, с.64-69.

3. **Saechnikov V.A., Spiridonov A.A.** Razrabotka bazovogo modula bortovyh sistem nanospudnika // *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2014, №8, s.6-9.
Саечников В.А., Спиридонов А.А. Разработка базового модуля бортовых систем наноспутника // *Гелиогеофизические исследования*, 2014, №8, с.6-9.
4. **Roeper G., Goldsmith R., Hatziathanasiou I., McLaren C., Maguire P.** Miniature TT&C module for small satellites in low earth orbits. 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications. ESA-ESTEC, 21 – 23 September 2010.
5. **Hatziathanasiou I., McLaren C.** Flexible S-Band TT&C for small spacecraft in LEO. 28th annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, 4 – 7 August 2014.
6. <http://www.stt-systemtechnik.de/index.php?id=18&L=1&id=18>
7. <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZN2PD2-63A+.pdf>
8. <https://www.everythingrf.com/products/microwave-rf-amplifiers/miteq/567-74-afs3-02000400-08-he-4>.
9. <https://www.datasheets360.com/part/detail/swm-1100/-8961684215011705898/>
10. <https://www.everythingrf.com/products/microwave-rf-amplifiers/miteq/567-74-avg4-00101200-det-8>.
11. **Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V.** Sputnikovye seti svyazi: Ucheb. posobie. – М.: «Alpina Publisher», 2004. – 536 s.
Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие. – М.: «Альпина Паблишер», 2004. – 536 с.
12. **Erohin G.A., Mandel V.I., Nestyorkin J.A.** Metodika rascheta energeticheskogo zapasa radiolinii // *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2018, tom 5, vyp. 1, s. 65–74.
Ерохин Г.А., Мандель В.И., Нестёркин Ю.А. Методика расчета энергетического запаса радиолонии // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2018, том 5, вып. 1, с. 65–74.
13. **Stivenston D.** Sputnikovoe televidenie v vashem dome. Per. s angl. – М.: DMK Press, 2010. – 432 s.
Стивенсон Д. Спутниковое телевидение в вашем доме. Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 432 с.

KIÇIK PEYK ÜÇÜN S-DİAPAZONLU TELEKOMMUNİKASIYA SİSTEMİ

X.İ. ABDULLAYEV, R.A. HƏSƏNOV, B.E. HÜSEYN-ZADƏ

Məqalədə aşağı-orbitli (1000 km) kiçik peyk üçün S-diapazonlu telekommunikasiya sisteminin rabitə modullarının (7 istehsalçıdan 12 tip modul) icmalı aparılmışdır. Telekommunikasiya sisteminin qurulmasının mümkün variantlardan birinin blok sxemi hazırlanmış və onun periferiya elementlərinin əsas xarakteristikaları müzakirə edilmişdir. Kiçik peyk üçün təklif olunmuş S-diapazonlu telekommunikasiya sisteminin “peyk-yer” radio xəttinin büdcəsinin hesabı aparılmış, sistemin yerüstü segmentinə qoyulan ümumi tələblər təyin edilmişdir.

Açar sözlər: radio rabitəsi, kommunikasiya peykləri, kiçik peyk, S-diapazonlu telekommunikasiya peyki, radio xəttin büdcəsi.

S-BAND TELECOMMUNICATION SYSTEM FOR SMALL SATELLITE

Kh.I. ABDULLAYEV, R.A. HASANOV, B.E. HUSEYN-ZADE

This article reviews the well-known S-band radio communication modules (12 items from 7 manufacturers) for the telecommunications system of a low-orbit (1000 km) small satellite (SS) was performed. A block diagram of one of the possible options for building a telecommunications system is compiled and the main characteristics of its peripheral units are discussed. The budget of the satellite-to-ground radio link of the S-band telecommunications system is calculated for the proposed SS and the general requirements for the characteristics of its ground segment are determined.

Keywords: radio communication, communication satellite, small satellite, S-band telecommunications satellite, budget of the radio link.

Поступило в редакцию: 15.03. 2019
После доработки: 13.09.2019
Принято к публикации: 25.09.2019