

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 629.78.075

DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-1

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАТИВНОСТИ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ МЕЖДУ АБОНЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

С. В. Васильев, Н. А. Кашеев, А. С. Кравченко,
В. С. Чаплинский, П. Е. Бушмелев

Исходные положения

Наземно-космическая информационная сеть как объект исследования представляет собой систему, в которой реализована возможность обмена информацией с космическими аппаратами (КА) непосредственно или с ретрансляцией через узлы сети, в том числе между наземными абонентами, обменивающимися друг с другом сообщениями.

Требуемая оперативность предполагает реализацию следующих основных режимов обмена двоичной информацией со скоростями:

– в режимах управления КА

радиолинии Земля–КА

передача командно-программной информации (КПИ) со скоростью 0,1... 1 кбит/с; 0,1...5 кбит/с соответственно на сутки (20...30 кбит) и на 30 суток (~1 Мбит, автономный режим);

радиолинии КА–Земля

передача телеметрической информации (ТМИ) со скоростью 1; 8; 32 кбит/с;

– в режиме передачи ИЦН и ТМИ

передача информации со скоростью 150...300 Мбит/с (скорость 300 Мбит/с представляется критерияльным показателем пригодности систем к выполнению целевых задач).

Вхождение в связь должно обеспечиваться практически в реальном масштабе времени (РМВ) по сравнению с нормативной длительностью сеанса связи (~5 мин).

Требуемое время обновления информации, доставляемой потребителям, обеспечивается количеством целевых КА ДЗЗ в орбитальной группировке [1–4]. Соответствующая зависимость представлена в [5]: при количестве КА в интервале 10...50 время обновления информации соответственно определяется значениями от 4,8 до 9,6 мин.

Используемые зависимости:

– энергетический баланс радиолиний в отсутствие внешних помех описывается известным соотношением [6]

$$\frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \lambda^2}{16\pi^2 k T_{\text{ш}} D^2} \geq \frac{P_{\text{с}}}{N_0}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ПРД}}$ – мощность передатчика; $G_{\text{ПРД}}$, $G_{\text{ПРМ}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно; λ – средняя длина волны; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град·Гц – постоянная

Стефана – Больцмана; $T_{\text{ш}}$ – эквивалентная шумовая температура антенно-фидерных трактов и приемника; D – дальность радиолинии;

– пороговое отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума на выходе приемника при передаче двоичной информации с вероятностью ошибочного приема двоичного символа 10^{-6} [6–7]

$$\frac{P_c}{N_0} \approx 25C, \quad (2)$$

где C – скорость передачи информации.

1. Оценка дальности действия и максимальной скорости передачи двоичной информации в НКИС на основе низкоорбитальных КА при минимальном сетевом оборудовании в зависимости от требуемого среднего количества КА (гипотетический вариант)

Минимальное сетевое оборудование предполагает использование только всенаправленных (в сфере 4π) антенн при следующих допущениях:

– минимальные значения коэффициентов усиления всенаправленных антенн КА –10дБ (в провалах диаграмм направленности). При этом из (1) следует энергетически оправданный выбор частотного диапазона – на низкочастотной границе радиокна прозрачности атмосферы ~150 МГц ($\lambda = 2$ м);

– расчетная высота орбиты $h = 500$ км. Мощность передатчика КА не должна превышать 10 Вт. Шумовая температура приемников ~1000 К. Возможные помехи ограничены шумами приемников. Вероятность ошибочного приема двоичного информационного символа 10^{-6} .

Любой КА для беспосредственного по угловым координатам вхождения в связь должен находиться в зоне радиовидимости какого-либо «соседнего» КА (рис. 1), что должно обеспечиваться требуемыми значениями максимального количества (N) КА в составе орбитальной группировки (ОГ) в зависимости от максимальной дальности действия радиолиний.

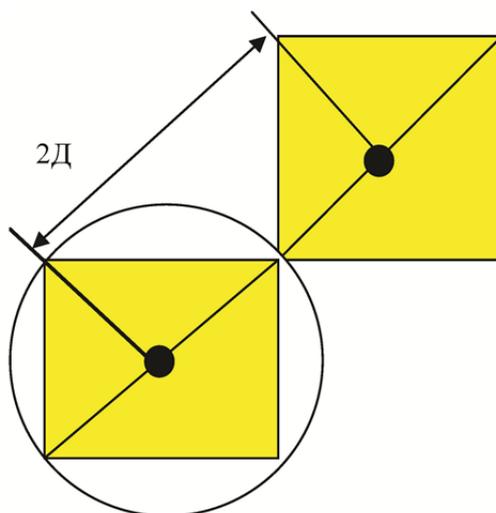


Рис. 1. К геометрическим соотношениям по определению дальности действия радиолиний КА–КА

На рис. 1 схематично изображены зоны видимости двух «соседних» КА на поверхности сферы радиусом $R_3 + h$ в виде окружностей радиусом D с центром нахождения КА и вписанных в окружности квадратов, характеризующих поверхность этой сферы, видимую КА, где $R_3 = 6370$ км – радиус Земли, h – высота орбиты.

Количество квадратов с максимально плотной укладкой на поверхности сферы радиусом $R_3 + h$ приблизительно равно минимальному количеству КА в составе глобальной НКИС, обеспечивающему вхождение в связь по межспутниковым линиям (МСЛ) без использования операции поиска по угловым координатам.

Маршрут обмена информацией организуется последовательным подключением «соседних» КА к инициатору сообщения с минимизацией количества ретрансляций в радиолиниях КА–КА. Организация маршрута осуществляется без использования баллистических целеуказаний, за исключением абонента «наземная станция», функционирующего в традиционных режимах. Всенаправленная антенна на КА распространяет информацию всем «соседним» КА. Задача поиска адресата решается путем передачи от КА-инициатора сообщения на КА, видимые инициатором, с последующей передачей сообщения по тому же алгоритму от этих КА далее по сети. Передача сообщения прекращается с нахождением адресата и передачи от него квитанции. Квитанция передается тем же способом, что и сообщение. Квитанция, полученная инициатором сообщения, прекращает операцию по передаче сообщения. Недостаток такой схемы НКИС очевиден – задействование ресурсов сети для реализации неэффективных сеансов обмена информацией при поиске абонентов.

Максимальная дальность радиолинии КА–КА по касательной к поверхности Земли между «соседними» КА представляется выражением

$$D_{\text{MAX}} = 2h\sqrt{1 + 2\frac{R_3}{h}} \quad (3)$$

При $h = 500$ км $D_{\text{MAX}} = 5145,8$ км.

Зависимости дальности действия D и максимальной скорости C передачи двоичной информации от требуемого среднего количества N КА в составе НКИС для $P_{\text{ПРД}} = 1$ Вт и $P_{\text{ПРД}} = 10$ Вт представлены в табл. 1. На рис. 2 иллюстрируется зависимость дальности действия от требуемого среднего количества КА в составе НКИС.

Таблица 1

Зависимость дальности действия МСЛ и максимальной скорости передачи двоичной информации от требуемого среднего количества КА в составе НКИС

N	45	48	74	132	297	1186	4743
D , км	5145,8	5000	4000	3000	2000	1000	500
C , бит/с, при $P_{\text{ПРД}} = 1$ Вт	27	29	45,9	80,8	183,7	735	2940
C , бит/с, при $P_{\text{ПРД}} = 10$ Вт	270	290	459	808	1837	7350	29400

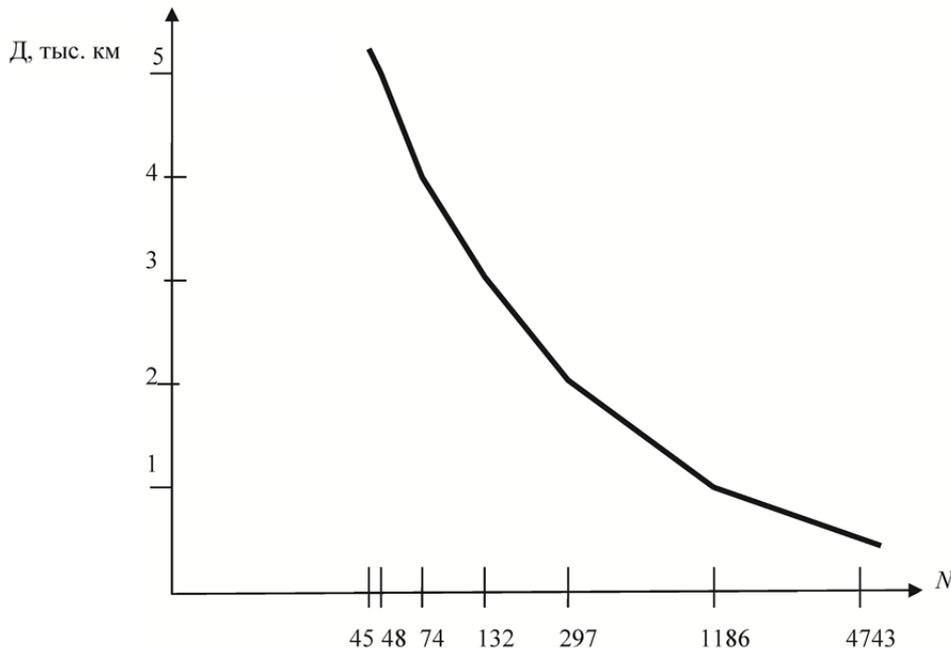


Рис. 2. Зависимость дальности действия D от требуемого среднего количества N КА в составе НКИС

Следует отметить, что отношение C/N согласно табл. 1 остается примерно постоянным и равным 0,6...0,62 при $P_{\text{прд}} = 1$ Вт и 6...6,2 при $P_{\text{прд}} = 10$ Вт, т.е. зависимость $C(N)$ является практически линейной.

2. Оценка характеристик НКИС с использованием специализированных СР на низких орбитах с баллистически организованной структурой

Структурная схема такой НКИС представлена на рис. 3, где АРУ ИУК – автономный региональный (в пределе однопунктный) унифицированный (совмещающий функции наземного комплекса управления – НКУ и наземного спецкомплекса – НСК) ИУК.

Исходные данные для проведения расчетов

Для режимов управления КА:

– спутники-ретрансляторы (СР), являющиеся узлами сети и образующие собственно сеть, размещаются равномерно на одной орбите с высотой $h_{\text{СР}} = 1500$ км в количестве $N_{\text{СР}}$, достаточном для обеспечения связи с целевыми КА в любой точке их орбиты;

– целевые КА (на высоте орбиты 500 км) сетевым оборудованием не оснащаются и взаимодействуют либо с наземной станцией (традиционный непосредственный *неоперативный* обмен информацией), либо с СР с применением всенаправленных или остронаправленных антенн.

Для реализуемости высокоскоростных режимов оперативного обмена информацией в НКИС могут применяться остронаправленные антенны K_U -диапазона частот ~ 15 ГГц или миллиметрового диапазона волн (ММДВ) ~ 5 мм (частотный диапазон ~ 60 ГГц).

Остальные характеристики при проведении расчетов определены исходными положениями.

Межспутниковые радиолинии (диапазон частот 60 ГГц)

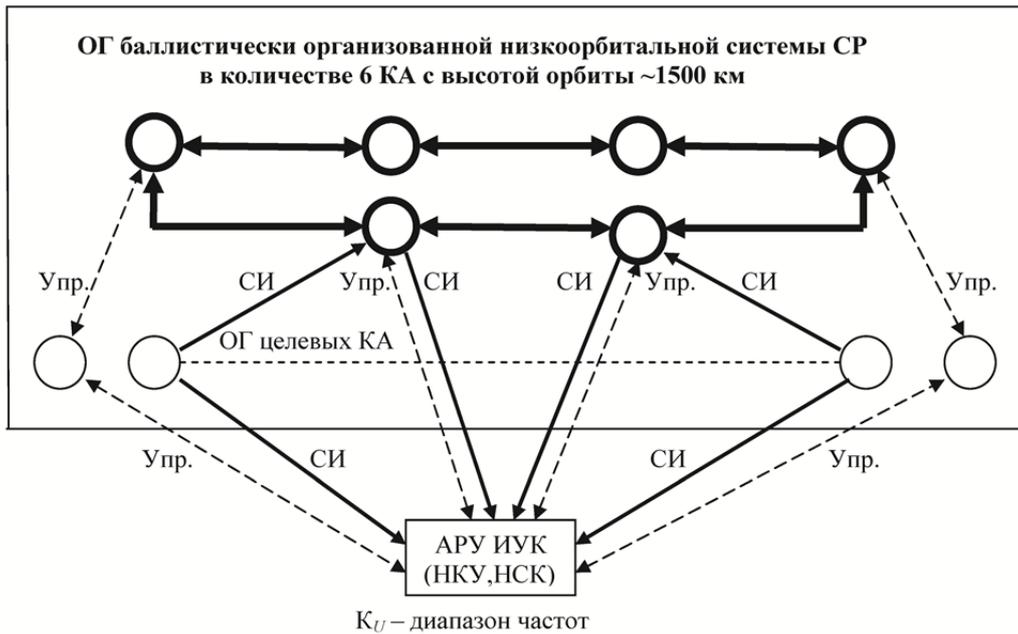


Рис. 3. Структурная схема НКИС с использованием специализированных СР на низких орбитах

Результаты расчетов

Максимальная дальность действия радиолиний КА–СР

Для КА с высотой 500 км, находящихся в одной орбитальной плоскости с СР, максимальная дальность действия $D_{\text{МАХ}}$ радиолиний КА–СР определяется по аналогии с выражением (3) значением

$$D_{\text{МАХ}} = 500 (1 + 2R_3 / 500)^{0.5} + 1500 (1 + 2R_3 / 1500)^{0.5} = 7195 \text{ км.}$$

Максимальная дальность действия радиолиний КА–СР при нахождении КА на максимальном удалении от СР (рис. 4) определяется значением

$$D_{\text{МАХ}} = [(R_3 + 500)^2 + (R_3 + 1500)^2]^{0.5} = 10\,147 \text{ км.}$$

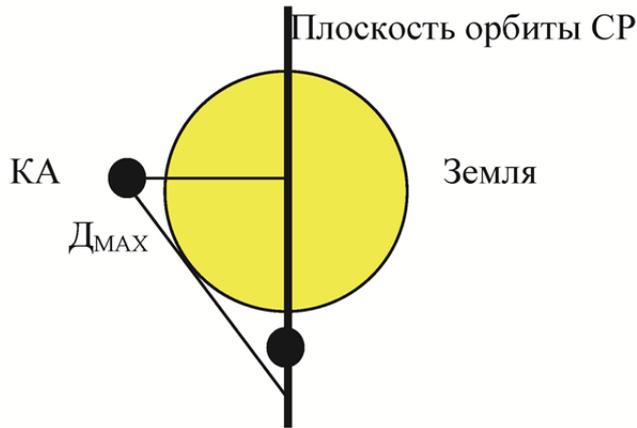
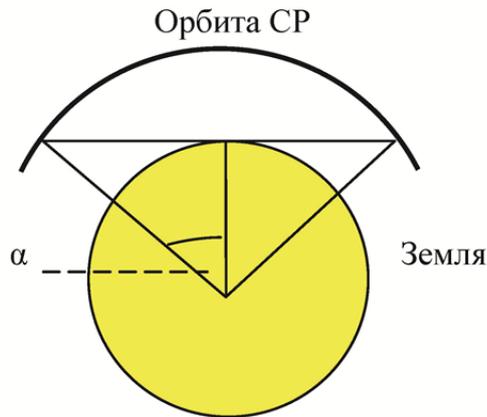


Рис. 4. К геометрическим соотношениям по определению максимальной дальности действия радиолиний КА–СР

Максимальная дальность радиолиний СР–СР определяется выражением

$$D_{CP} = 2\pi (6370 + 1500) / N_{CP}.$$

Зависимости D_{CP} и количества N_B (видимых СР из любой точки орбиты целевого КА) от количества СР в составе НКИС представлены в табл. 2. Количество N_B определяется для схемы, когда КА находится в одной плоскости с орбитой СР, как округленное до целого значения в меньшую сторону количество СР в пространстве, ограниченном телесным углом из центра Земли 2α (рис. 5).



$$\sin \alpha = h_{CP} (1 + 2 R_3 / h_{CP})^{0,5} / (R_3 + h_{CP}) = 0,59, 2\alpha = 72^\circ.$$

Рис. 5. К определению телесного угла 2α видимости орбиты СР

В телесном угле 72° находится $72/360 = 0,2$ протяженности орбиты СР. Для КА, находящихся в других плоскостях, количество видимых СР может возрастать до максимального значения N .

Таблица 2

Зависимости D_{CP} и количества N_B от количества СР в составе НКИС

N_{CP}	4	5	6	7	8	9	10
D_{CP} , км	12356	9885	8238	7061	6178	5492	4943
N_B	0	1	1	1	1	1	2

Из табл. 2 следует возможность оперативного обмена информацией в НКИС при количестве СР 5...10 и дальности действия радиолинии СР–СР соответственно 9885...4943 км.

Характеристики радиолиний НКИС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики радиолиний НКИС

Радиолиния	Диапазон частот, ГГц	Мощность передатчика, Вт	Тип антенны	Диаметр зеркала параболической антенны, м	Скорость передачи информации
СР–СР ($D_{СР} = 8238$ км)	15 60	10 10	Параболическая Параболическая	1 1	212 Мбит/с* 3394 Мбит/с
КА–СР ($D_{\max} = 10147$ км)	15 60	1 1	Всенаправленная на КА Параболическая на СР Параболическая на КА Параболическая на СР	– 1 1 1	100 бит/с* 223 Мбит/с* (при $C = 300$ Мбит/с мощность передатчика КА должна составлять ~1,5 Вт)
СР–КА ($D_{\max} = 10147$ км)	60	10	Параболическая на КА Параболическая на СР	1 1	2230 Мбит/с

Примечание: * – характеристики радиолиний, не соответствующие требованию по скорости передачи информации 300 Мбит/с – основание для выбора частотного диапазона МСЛ 60 ГГц, применения параболических антенн на целевых КА и увеличения мощности передатчика целевых КА до уровня ~1,5 Вт.

Выводы

1. Многоспутниковая НКИС без сетевого оборудования радиолиний КА–КА может функционировать в режимах малых скоростей обмена информацией, не соответствующих предъявленным в настоящее время требованиям, при количестве КА-абонентов в составе сети – десятки и сотни, что приемлемо только для перспективных маломассогабаритных КС с использованием микро- и нанотехнологий и особыми для таких КС задачами.

2. Проведенные оценки определяют необходимость создания и применения межспутниковых радиолиний НКИС в диапазоне частот 60 ГГц. Для радиолиний «Земля-КА» и «Земля-СР» целесообразно применение K_L -диапазона частот.

3. Оценки характеристик НКИС с использованием специализированных СР на геостационарной орбите (ГСО) известны и характеризуются значительно большими затратами при реализации радиолиний протяженностью ~40 тыс. км и более по сравнению с вариантом использования системы специализированных СР на низких орбитах, который представляется наиболее предпочтительным.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Modeling the Effect of Local Thermal Effect on the Stress-strain state of the Conductive Layer Printed Circuit Board / A. Telegin, A. Zatytkin, M. Kalaev, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43827–43830.
2. Study Algorithm Speed Signal Generating Feedback for Information-measuring System Control Active Vibration Protection Red / P. Bushmelev, A. Pivkin, B. Kumatov, A. Lysenko, S. Zatytkin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43831–43834.
3. Калаев, М. П. Анализ современных средств определения динамических характеристик конструкции / М. П. Калаев, О. Н. Герасимов, А. В. Лысенко // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – Сочи, 2015. – Т. 1. – С. 555–557.

4. Таньков, Г. В. Исследование влияния частоты внешнего воздействия на величину инерционной силы в электрорадиоэлементах бортовой радиоаппаратуры / Г. В. Таньков, А. В. Затылкин, Д. В. Ольхов // Научный альманах. – 2015. – № 9, вып. 11. – С. 829–833.
5. Кашеев, Н. А. Методы и основные результаты оценки, требования и рекомендации по обеспечению эффективности автономных региональных унифицированных информационно-управляющих комплексов космических систем наблюдения / Н. А. Кашеев, О. И. Герасимов, В. С. Чаплинский // Управление и высокие технологии. – 2014. – № 4 (28). – С. 109–119.
6. Вимберг, Г. П. Энергетические характеристики космических радиолоний / Г. П. Вимберг, Ю. В. Виноградов, А. Ф. Фомин ; под ред. О. А. Зенкевича. – М. : Сов. радио, 1972. – 346 с.
7. Головин, П. Д. Применение метода квазиобразцового интервала времени для раздельного измерения параметров параметрических датчиков / П. Д. Головин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Управление и высокие технологии. – 2013. – № 4. – С. 149–157.

Васильев Сергей Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, начальник отдела,
Научно-исследовательский центр
Центрального научно-исследовательского института
Войск воздушно-космической обороны
(141091, Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Тихонравова, 29)
E-mail: pashakolendo@mail.ru

Кашеев Николай Александрович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл., г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 27)
E-mail: info@niiiks.com

Кравченко Алексей Сергеевич

научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл., г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 27)
E-mail: pashakolendo@mail.ru

Чаплинский Владимир Степанович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл., г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 27)
E-mail: info@niiiks.com

Бушмелев Петр Евгеньевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
научно-исследовательский отдел,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Vasil'ev Sergej Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist, head of department,
Scientific Research Center
of Central Scientific Research Institute
of Armies of Aerospace Defence
(141091, 29 Tihonravov street, Korolev,
Moscow region, Russia)

Kashcheev Nikolay Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 27 Tihonravov street, Yubileynyy,
Moscow region, Russia)

Kravchenko Aleksey Sergeevich

stuff scientist,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 27 Tihonravov street, Yubileynyy,
Moscow region, Russia)

Chaplinskiy Vladimir Stepanovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 27 Tihonravov street, Yubileynyy,
Moscow region, Russia)

Bushmelev Petr Evgenyevich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
scientific research department,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. Решена задача обоснования характеристик информационно-управляющих комплексов (ИУК) космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с обеспечением требований по времени вхождения в связь и скоростям обмена информацией между наземными и космическими абонентами, организованными в низкоорбитальную наземно-космическую информационную сеть (НКИС). Приведена оценка дальности действия и максимальной скорости передачи двоичной информации в НКИС на основе низкоорбитальных КА при минимальном сетевом оборудовании в зависимости от требуемого среднего количества КА. Получена оценка характеристик НКИС с использованием специализированных спутников-ретрансляторов (СР) на низких орбитах с баллистически организованной структурой. Показано, что многоспутниковая НКИС без сетевого оборудования радиолиний КА-КА может функционировать в режимах малых скоростей обмена информацией, не соответствующих предъявляемым в настоящее время требованиям, при количестве КА-абонентов в составе сети – десятки и сотни, что приемлемо только для перспективных маломассогабаритных КС с использованием микро- и нанотехнологий и особыми для таких КС задачами. На основе проведенных оценок определена необходимость создания и применения межспутниковых радиолиний НКИС в диапазоне частот 60 ГГц. Для радиолиний «Земля-КА» и «Земля-СР» целесообразно применение КУ-диапазона частот. Показано, что НКИС характеризуются значительно большими затратами при реализации радиолиний протяженностью свыше 40 тыс. км по сравнению с вариантом использования системы специализированных СР на низких орбитах, который представляется наиболее предпочтительным.

Ключевые слова: информационно-управляющий комплекс, наземно-космическая информационная сеть, оперативность обмена информацией, межспутниковые радиолинии, ретрансляторы.

Abstract. The problem study the characteristics of information and control systems (IAA) Space Systems (SS) remote sounding of the Earth (RSE) with maintenance of requirements on occurrence time in communication and to speeds of information interchange between the land and space subscribers organised in low orbital a land-space information network (LOLSIN) is solved. The estimation range and the maximum data rate information in binary N'kisi through LEO satellites with minimal network equipment according to the required average number of satellites. An estimate of the characteristics of LOLSIN using specialized satellite-repeaters (CP) in low orbits with ballistic organized structure. It is shown that Multisatellite LOLSIN without network equipment of radio SC-SC can operate in modes of small information exchange rates do not meet currently required in the requirements, with the number of SC-subscribers on the network – tens and hundreds of what is acceptable only for prospective malomassogabaritnyh COP using micro and nano technologies and special for these tasks COP. On the basis of assessments determined by the need to create and use of inter-satellite radio links LOLSIN in the frequency range 60 GHz. For radio links "Earth-spacecraft" and "Earth-CP" appropriate use of frequencies KU-band. It is shown that LOLSIN characterized by much larger costs in the implementation of radio, which is over 40 thousands kilometers, compared to a use of specialized SR system in low orbits, which is the most preferred.

Key words: information and control complex, a land-space information network, efficiency of information interchange, inter-satellite radio, repeaters.

УДК 629.78.075

Методы и результаты синтеза характеристик оперативности обмена информацией между абонентами информационно-управляющих комплексов на основе низкоорбитальных информационных сетей / С. В. Васильев, Н. А. Кашеев, А. С. Кравченко, В. С. Чаплинский, П. Е. Бушмелев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 3–10. DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-1.