

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.3.60.69 EDN GARLSV

Системный подход к проектированию радиолиний низкоорбитальных многоспутниковых систем передачи данных

А. И. Жодзишский, *д. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Круглов, *д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация

М. С. Леонов, *д. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Яхутин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. С позиций системного подхода рассматриваются особенности построения низкоорбитальных многоспутниковых группировок, создаваемых в рамках федеральной программы «Сфера». Космические аппараты подобных группировок имеют относительно малую массу и электропотребление. Для них характерно совместное использование целевых радиолиний и радиолиний командно-измерительных систем для управления КА при высокой интеграции бортовой аппаратуры, а также групповой запуск нескольких однотипных КА с последующим разведением по заданным орбитам.

Управление низкоорбитальными многоспутниковыми группировками передачи данных планируется с помощью как наземных станций КИС, так и шлюзовых станций ретрансляции целевой информации. Задача обеспечения электромагнитной совместимости в многоспутниковых группировках должна решаться системно на всех этапах их функционирования с использованием при планировании сеансов связи имитационного моделирования.

Приводится формула, позволяющая оценивать пороговое значение отношения энергии сигнала к суммарной спектральной плотности мощности мешающих излучений в радиолиниях многоспутниковых группировок при кодовом разделении каналов.

Ключевые слова: низкоорбитальные спутниковые системы, критерий проектирования, управление орбитальными группировками, электромагнитная совместимость, методы многостанционного доступа, кодовое разделение каналов

System Approach to Design of Radio Lines for Low-Orbit Multisatellite Data Transmission Systems

A. I. Zhodzishsky, *Dr. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Kruglov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
MIREA- Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

M. S. Leonov, *Dr. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Yakhutin, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper studies the peculiarities of building low-orbit multisatellite constellations created within the framework of the federal project "Sphere" from the standpoint of a system approach. Spacecraft of such constellations have a relatively low mass and power consumption. They are characterized by joint use of target radio lines and command and measurement system radio lines for spacecraft control with high integration of onboard equipment, as well as by group launch of several single-type spacecraft with subsequent dispensing into specified orbits.

Control of low-orbit multisatellite data transmission constellations is planned both by means of ground stations of a command and measurement system and gateway stations for retransmission of target information. The task of ensuring electromagnetic compatibility in multisatellite constellations should be solved systematically at all stages of their operation with the use of simulation modeling when planning communication sessions.

A formula is given that allows estimating the threshold value of the ratio of signal energy to the total power spectral density of interfering radiations in radio lines of multisatellite constellations at CDMA.

Keywords: low-orbit satellite systems, design criterion, orbital constellation control, electromagnetic compatibility, multiple access methods, CDMA

Введение

Низкоорбитальные многоспутниковые системы широко используются на Западе для детального оперативного наблюдения Земли (ДЗЗ), глобальной связи и передачи данных. В России создание подобных систем проводится в рамках федеральной программы «Сфера».

Низкоорбитальные многоспутниковые системы могут быть эффективными при соблюдении следующих условий:

- функциональном объединении КА в единую орбитальную группировку (ОГ);
- поточном производстве малых КА, образующих ОГ;
- миниатюризации бортовой аппаратуры (БА) с интеграцией различных функций, в том числе функций радиолиний управления и целевых радиолиний;
- групповом запуске КА на орбиту;
- автономизации функционирования КА;
- высокой степени автоматизации процессов управления КА в наземном комплексе управления (НКУ).

Существуют принципиальные отличия в требованиях к многоспутниковым ОГ ДЗЗ, связи и передачи данных, обусловленные следующими факторами:

- КА ДЗЗ являются источниками информации, для передачи которой требуются высокоскоростные радиолинии (ВРЛ). Передача полученной информации по ВРЛ в реальном времени и объединение КА ОГ в единую сеть необязательно;

- КА связи и передачи данных являются ретрансляторами информации «чужих» источников. Голосовая связь требует объединения КА ОГ в единую сеть с помощью межспутниковых радиолиний либо шлюзовых станций, называемых часто региональными станциями сопряжения (РСС). Передача речи требует реального времени с задержкой прохождения сигнала не более долей секунды. Передача данных допускает более длительные задержки сигнала.

В штатном режиме КА связи и передачи данных могут в течение длительного периода функционировать автономно и не нуждаться в управлении с наземных пунктов, в то время как на низкоорби-

тальные КА ДЗЗ требуется закладка командно-программной информации (КПИ) для перенацеливания бортовой аппаратуры на конкретные районы наблюдения и сброса информации.

Функциональное объединение КА в многоспутниковые ОГ позволяет существенно повысить глобальность, оперативность и устойчивость решения ими целевых задач.

Актуальной является разработка технологии управления низкоорбитальными многоспутниковыми группировками малых КА с учетом существующих ограничений, основными из которых являются необходимость размещения наземных станций управления на территории России и возможности отечественной ракетно-космической и радиоэлектронной промышленности.

Проектирование многоспутниковых систем с позиций системного подхода рассматривалось в ряде работ [1–3]. Однако распределение функций по управлению КА между бортовыми комплексами управления (БКУ), НКУ, наземными специальными (целевыми) комплексами (НСК) проработаны недостаточно, а обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) и многостанционного доступа при управлении низкоорбитальными многоспутниковыми группировками нуждается в детальном исследовании.

Ниже проектирование радиолиний низкоорбитальных многоспутниковых систем передачи данных (МСПД) производится с позиций системного подхода, который предполагает решение целевых задач рассматриваемой системы при минимизации затрат на ее создание и эксплуатацию. Отметим, что в первую очередь следует стремиться к уменьшению эксплуатационных расходов за счет сокращения числа операторов и обслуживающего персонала, что достигается увеличением автономности работы БКУ и автоматизацией процессов управления в НКУ и НСК.

Построение низкоорбитальной многоспутниковой системы передачи данных

Обобщенная функциональная схема низкоорбитальной МСПД приведена на рис. 1. По существу,

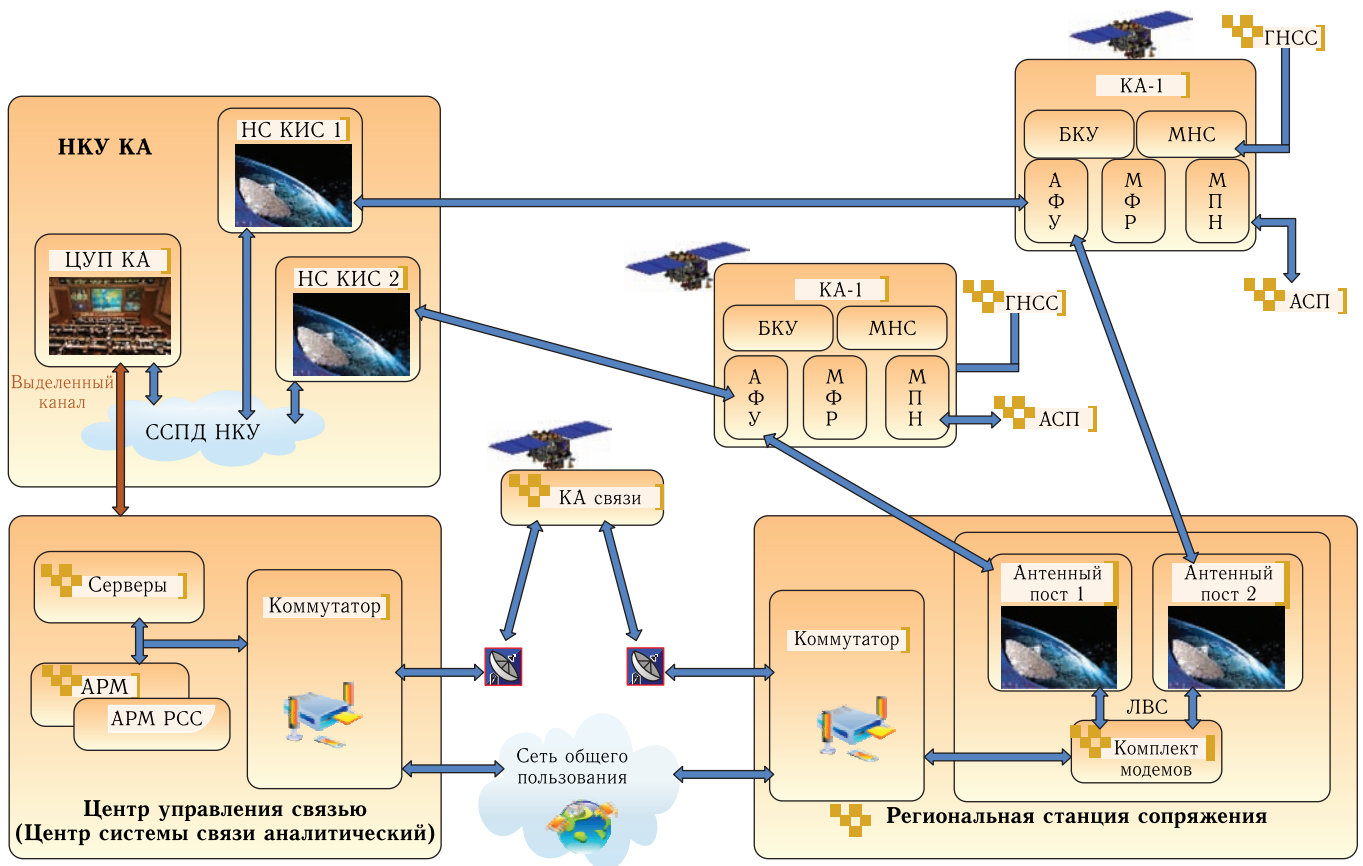


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема низкоорбитальной многоспутниковой системы передачи данных

это схема МСПД «Марафон IoT», основной целевой задачей которой является создание глобальной спутниковой сети «Интернет вещей», охватывающей в первую очередь всю территорию России. Планируется, что ОГ системы будет состоять из 264 КА, включая 12 резервных, находящихся на круговых орбитах с высотой 750 км, наклоном 89° и числом плоскостей 12 по 22 КА в каждой плоскости [4]. Информационный обмен между КА ОГ не предусматривается.

На КА устанавливаются модули полезной нагрузки (МПН), обеспечивающие взаимодействие по собственным радиолиниям с аппаратурой средств пользователей (АСП). Принимаемые сигналы всех пользователей выделяются, демодулируются, и содержащаяся в них информация поступает в модуль фидерной радиолинии (МФР).

В МФР она мультиплексируется с телеметрической информацией (ТМИ), в составе которой передаются данные бортовой навигационной аппара-

туры потребителя (БНАП) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), называемой модулем навигации и синхронизации (МНС). Отметим, что фидерная радиолиния является низкоскоростной (скорость передачи меньше 10 Мбит/с), на которую должен распространяться отраслевой стандарт [5].

Радиосигналы, сформированные в МФР, через АФУ передаются на РСС. Все РСС через наземные каналы или спутниковые каналы других систем (не «Марафон») соединены с центром управления связью (ЦУС), который в системе «Марафон» называется центр системы связи аналитический (ЦССА).

НКУ состоит из центра управления полетом (ЦУП) и нескольких наземных станций КИС, объединенных системой связи и передачи данных (ССПД). ЦУП также связан с ЦУС.

НС КИС по радиолиниям взаимодействует с МФР, который, таким образом, совмещает функции БА КИС и функции БА целевой фидерной радиолинии (радиолинии с РСС). При этом НС КИС

должна обеспечивать управление в любом режиме функционирования как при ориентированном, так и неориентированном КА. На НС КИС также возлагается функция измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) движения КА. Наиболее информативным ИТНП для низкоорбитальных КА является радиальная скорость, погрешность определения которой при запросном когерентном методе не должна превышать нескольких мм/с. Отметим, что указанная погрешность может быть достигнута только при жесткой привязке результатов измерений к фиксированному моменту, например к середине или концу интервала измерения.

В таблице для многоспутниковой ОГ приведены различные режимы функционирования КА и задачи по его управлению, решение которых возможно с помощью НС КИС и РСС. В общем случае таких режимов пять.

1. Режим приведения (вывод) КА на рабочую орбиту. При этом различаются формирование и восполнение ОГ. Как правило, формирование ОГ производится групповым запуском большего числа КА, отделяемых от разгонного блока (РБ) с последующим разведением их по рабочим орбитам. Восполнение ОГ может осуществляться попутным запуском одиночных КА. Отделение КА от РБ и разведение их по рабочим орбитам планируется осуществлять

в автономном режиме с телеметрическим контролем НС КИС. При этом желательно предусмотреть возможность передачи КПИ на отдельные КА в случае нештатной ситуации.

2. Режим целевого использования является основным, ради которого создается космическая система. В этом режиме КА находится в ориентированном положении, а РСС, взаимодействуя с МФР, осуществляет прием/передачу целевой (специальной) информации. Одновременно РСС принимает ТМИ с КА, в состав которой включены данные БНАП о текущем местоположении КА. Через РСС принципиально возможна передача на КА и КПИ.

С помощью НС КИС в этом режиме должны проводиться контрольные сеансы управления. Необходимое количество сеансов зависит от степени отработки технологии управления.

3. Режим нештатной ситуации связан с отклонениями в функционировании КА от запланированного. При возникновении на КА нештатной ситуации БКУ формирует сигнал «Вызов НКУ», который передается через МФР. Этот сигнал может быть принят РСС при полете КА в зоне ее радиовидимости. Если запланированный с РСС сеанс связи не состоялся по вине КА, то данное событие следует рассматривать как «Вызов НКУ».

Т а б л и ц а. Задачи по управлению КА многоспутниковой ОГ, обеспечиваемые модулем фидерной радиолнии

Режим функционирования ОГ	Задачи по управлению КА	
	с помощью РСС	с помощью НС КИС
1. Приведение (вывод) КА на рабочую орбиту после отделения от РБ	—	— Слежение и телеметрический контроль всех выводимых КА — Передача КПИ на отдельные КА
2. Целевое использование (ориентированный КА)	— Прием ТМИ — Получение данных от БНАП о местонахождении КА (в составе ТМИ) — Передача КПИ	Проведение контрольных сеансов управления с ИТНП (радиальная скорость)
3. Нештатная ситуация	Получение сигнала «Вызов НКУ»	Проведение необходимого количества сеансов управления для парирования нештатной ситуации
4. Орбитальный резерв	—	Проведение контрольных сеансов управления с ИТНП
5. Увод КА с орбиты	—	Проведение сеансов управления с ИТНП по обеспечению увода КА

4. Режим орбитального резерва необходим для поддержания работоспособности находящегося на резервной орбите КА до ввода его в состав штатной ОГ.

5. Режим увода КА с орбиты является заключительным этапом жизненного цикла КА низкоорбитальной ОГ.

Два последних режима обеспечиваются с помощью НС КИС.

Особенности проектирования радиолиний низкоорбитальных многоспутниковых систем

Первым вопросом при проектировании радиолиний является выбор диапазона частот и получение соответствующего разрешения на его использование [6]. Согласно регламенту радиосвязи управление КА рекомендуется осуществлять в диапазоне, выделенном для целевой радиолинии [7].

На рис. 2 отмечены полосы частот С-диапазона, которые в настоящее время используются или планируется использовать в России (в интересах

фиксированной спутниковой службы) для КА связи и передачи данных на геостационарной и высокоэллиптических орбитах. Для управления этими КА отведены полосы, в которых частота запроса выше, чем частота ответа ($f_3 > f_{от}$).

Для магистральных радиолиний многоспутниковых систем связи и передачи данных («Гонец-М1» и «Марафон IoT») предлагаются полосы, в которых частоты запроса меньше частот ответа ($f_3 < f_{от}$), что характерно для подвижной спутниковой службы. Это приводит к необходимости использования двух типов КИС:

- НС КИС типа «Клен» для управления геостационарными и высокоэллиптическими КА;
- новых НС КИС для управления КА «Марафон IoT» и «Гонец-М1».

В диаграмму направленности приемных антенн многоспутниковой системы одновременно могут попадать несколько излучений от передающих радиотехнических средств этой системы. На рис. 3 изображена ситуация, когда КА1 работает с антенным постом АП1 РСС пункта 1. При этом в его диаграмму направленности одновременно попадают излучения от двух антенн РСС, работающих с другими КА. На рисунке это антенный пост АП2

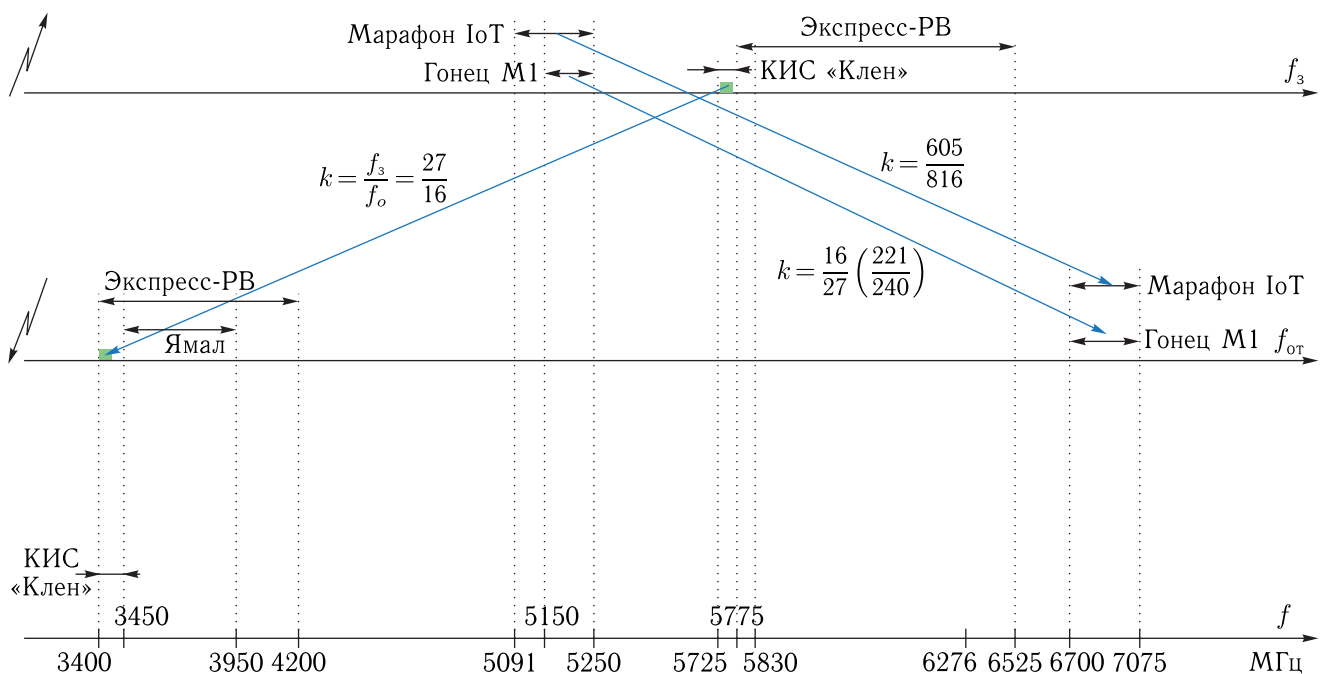


Рис. 2. Использование С-диапазона частот для управления перспективными отечественными КА связи и передачи данных

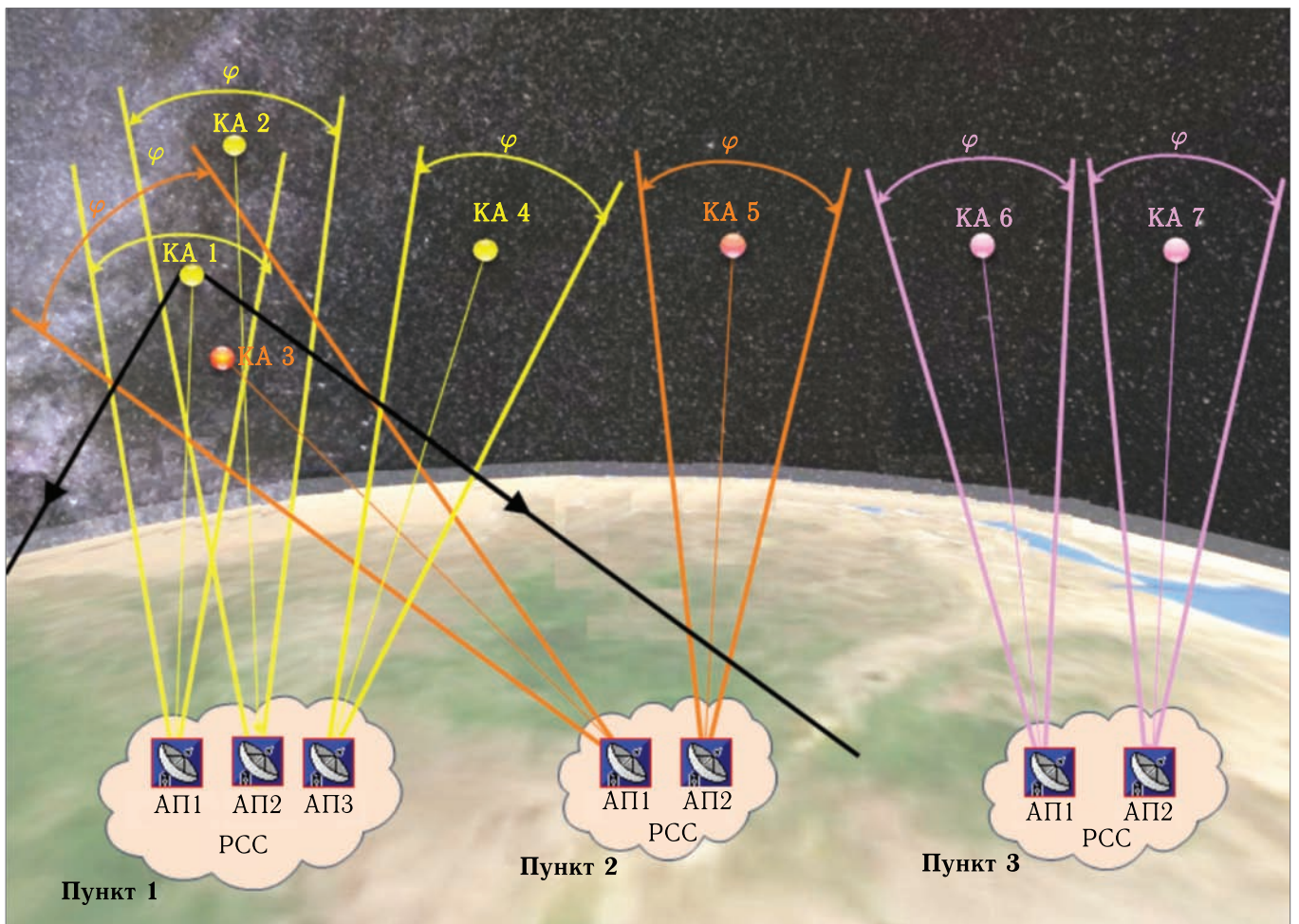


Рис. 3. К определению количества сигналов наземных станций, одновременно попадающих в диаграмму направленности бортовой антенны КА

этого же пункта и антенный пост АП1 РСС пункта 2. Необходимо, чтобы эти излучения не мешали друг другу.

Напомним, что для параболических антенн, используемых в РСС и НС КИС, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности равна:

$$\Psi_{0.5} = 70 \frac{\lambda}{d},$$

где λ — длина волны радиосигнала;

d — диаметр зеркала антенны (в МСПД «Ма- рафон IoT» у РСС $d = 1,2$ м, у НС КИС $d = 3,2$ м).

При групповом запуске в диаграмме направленности антенны наземной станции одновременно находятся несколько КА, а в диаграмме направленности бортовой антенны — несколько наземных

станций. Таким образом, для радиолиний много- спутниковых ОГ возникает проблема разделения каналов в отведенном диапазоне частот для работы наземных станций с разными КА ОГ. Рис. 4 поясняет эту проблему.

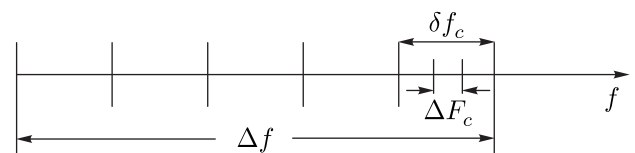


Рис. 4. К разделению каналов в отведенном диапазоне частот

На рис. 4 обозначено:

- Δf — отведенный радиолинии диапазон частот;
- δf_c — полоса частот излучаемого радиосигнала;

$\Delta F_c = \frac{1}{\tau_c}$ — ширина спектра частот информационного символа длительностью τ_c .

Диапазон частот ΔF разбивается на m неперекрывающихся полос, шириной не менее δf_c , центральные частоты которых образуют m частотных литеров (на рисунке $m = \frac{\Delta F}{\delta f}$).

Если в приемную антенну попадает сигнал, излучаемый только одним КА (или одной НС), то отношение энергии сигнала E_6 на бит информации к спектральной плотности шума N_0 на входе приемника определяется известными формулами:

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{P_c \cdot \alpha}{N_0 \cdot \Delta F_c}, \quad (1)$$

где P_c — мощность сигнала на входе приемника;

$\alpha \leq 1$ — коэффициент использования мощности, зависящий от вида модуляции и учитывающий ее распределение между остатком несущей, а также между ортами передаваемого сигнала P_c ;

$$P_c = \frac{\text{ЭИИМ} \cdot G_{\text{прм}}}{\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \cdot L_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где ЭИИМ — эффективная изотропно-излучаемая мощность;

$G_{\text{прм}}$ — усиление приемной антенны;

R — дальность связи;

L_{Σ} — дополнительное ослабление сигнала на трассе распространения и в приемном тракте.

$$N_0 = kT_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/КГц — постоянная Больцмана;

$T_{\text{ш}}$ — температура шума, приведенная ко входу приемника.

Для допустимой вероятности p_e ошибочного приема символа информации и рассчитанного по формулам (1)–(3) отношения $\frac{E_6}{N_0}$ можно оценить целесообразность применения помехоустойчивого кодирования и в случае применения определить пороговое отношение $\left(\frac{E_6}{N_0}\right)_{\text{пор}}$ для выбранного кода. В качестве примера на рис. 5 приведена зависимость p_e от $\left(\frac{E_6}{N_0}\right)_{\text{пор}}$ для различных помехоустойчивых кодов.

Применение эффективных помехоустойчивых кодов актуально для ВРЛ [7]. В фидерных радиолиниях низкоорбитальных МСПД из-за сравнительно малой дальности связи R и относительно невысокой скорости передачи информации проблема заключается не в обеспечении энергетического потенциала для достижения высокой достоверности передачи информации, а в обеспечении ЭМС как с другими РЭС, работающими в этом же диапазоне частот (внешняя ЭМС), так и со средствами самой многоспутниковой системы (внутрисистемная ЭМС).

Согласно рекомендациям международного комитета по радиосвязи в диапазоне 1–10 ГГц спектральная плотность мощности $N_{\text{пх}}$ от «мешающих» РЭС (внешняя ЭМС) должна быть на 6 дБ меньше спектральной плотности шума N_0 .

$$\frac{N_0}{N_{\text{пх}}} \geq 6 \text{ дБ.}$$

Это требование приводит к необходимости расширения спектра используемых сигналов, т. е. к работе с широкополосными сигналами.

Требования к обеспечению внутрисистемной ЭМС оказываются совсем иными. Можно показать, что отношение E_6 к сумме (N_{Σ}) спектральной плотности мощности шума N_0 и n «мешающих» излучений с равной мощностью P_c и полностью перекрывающимися спектрами (при кодовом разделении каналов) оценивается выражением

$$\frac{E_6}{N_{\Sigma}} \leq \frac{P_c \cdot \alpha}{N_0 \Delta F_c + P_c \cdot n \cdot \frac{\Delta F_c}{\delta f_c}}. \quad (4)$$

Известно, что чем больше база сигнала, т. е. отношение $\frac{\delta f_c}{\Delta F_c}$, тем выше помехозащищенность радиолинии и эффективность кодового разделения каналов. Классическим примером эффективного кодового разделения каналов является ГНСС GPS, на общей несущей частоте которой работают все спутники этой системы в диапазоне L1. При этом $\Delta F_c \approx 50$ Гц (скорость передачи — 50 бит/с), $\delta f_c \approx 2$ МГц (тактовая частота псевдослучайной последовательности — 1,024 МГц), помехоустойчивое кодирование не используется (осуществляется только проверка на четность).

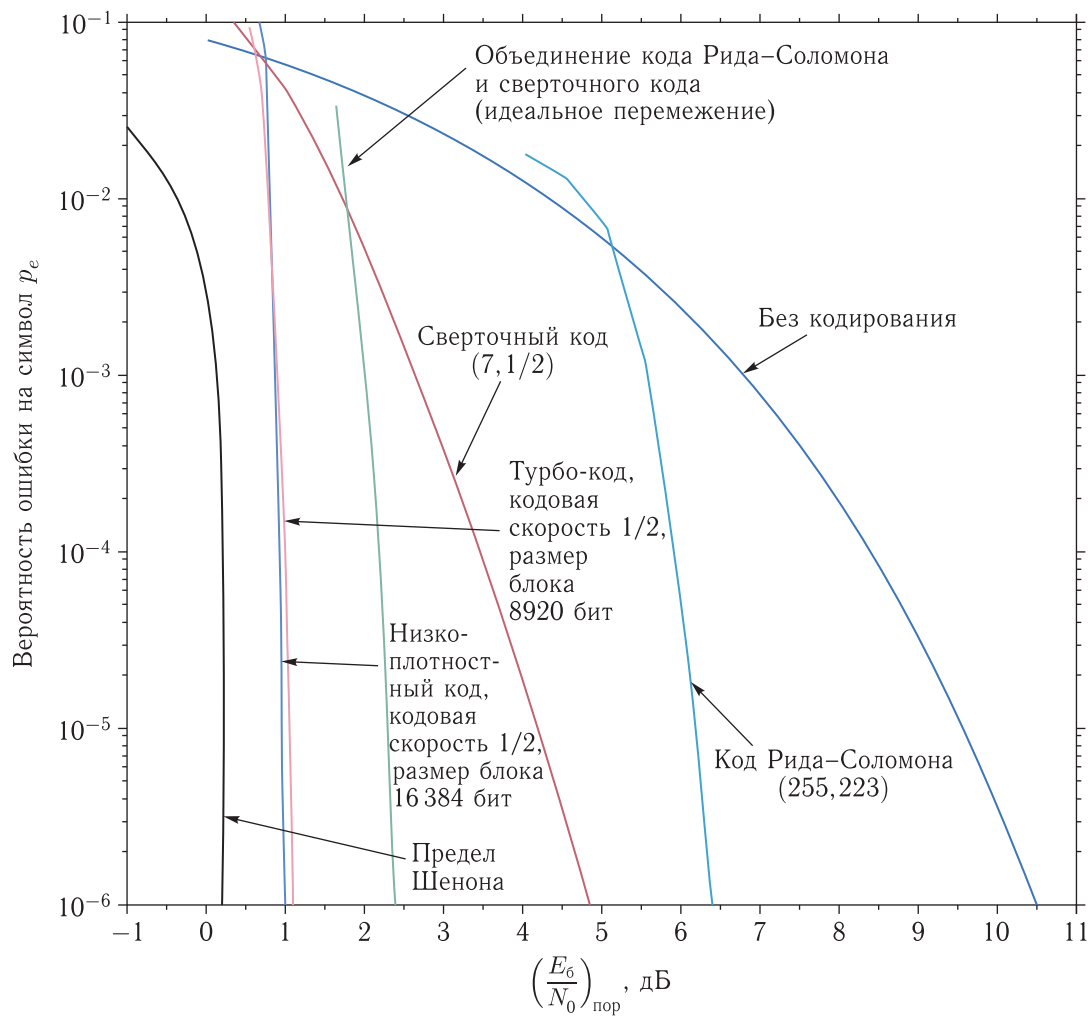


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки приема бита (символа) информации от E_b/N_0

В рамках единой космической системы возможно планирование сеансов связи наземных станций и КА этой системы в различных режимах ее функционирования с учетом пространственно-временного разделения каналов в радиолиниях. Планирование сеансов осуществляется в ЦУП с помощью имитационной модели движения КА ОГ. Актуальная имитационная модель, отражающая текущее состояние КА ОГ и привлекаемых к управлению НС, существенно повышает качество и оперативность планирования. На стадии проектирования космической системы имитационная модель позволит оптимизировать размещение наземных станций, оценивать их загрузку, выявлять и предусматривать разрешение конфликтных ситуаций в части разделения каналов и обеспечения ЭМС.

Дополнительно к пространственно-временному разделению каналов в МСПД для многостанционного доступа и обеспечения ЭМС возможно использование в МФР и соответствующих НС следующих технических решений:

- работа с разными скоростями передачи и приема информации, в том числе с низкой скоростью (не более 100 бит/с) для повышения эффективности кодового разделения каналов;
- смена литеры несущей частоты по инициативе ЦУП;
- регулировка по программе излучаемой мощности в определенных направлениях вплоть до полного отключения.

Внедрение указанных организационно-технических мероприятий позволит решить проблему

обеспечения ЭМС отечественных низкоорбитальных многоспутниковых систем передачи информации.

С позиций системного подхода при проектировании оптимальным является критерий решения целевых задач рассматриваемой системы при минимизации затрат на ее создание и эксплуатацию. При этом должны учитываться объективные ограничения, связанные с имеющимися научно-техническими и технологическими возможностями. Субъективными факторами, препятствующими применению указанного критерия, являются превалирование ведомственных и корпоративных интересов, недостаточная компетенция и заинтересованность лиц, принимающих решения.

Заключение

Применение системного подхода при проектировании предполагает решение целевых задач рассматриваемых систем с минимизацией затрат на их создание и эксплуатацию. Для низкоорбитальных многоспутниковых систем это обуславливает:

- максимальную автономизацию работы КА с определением на борту и последующей передачей в составе ТМИ данных о текущем местонахождении КА;

- задействование для управления КА наряду с радиолиниями КИС целевых радиолиний.

Основными проблемами при проектировании радиолиний МСПД являются согласование используемых полос частот и выбор сигнально-кодовых конструкций для обеспечения электромагнитной совместимости как внутрисистемной, так и с другими РЭС. Указанные проблемы могут быть решены с использованием управления режимами функционирования МФР из ЦУП в зависимости от режима работы КА.

Планирование сеансов связи с КА в многоспутниковых системах должно проводиться в ЦУП с помощью имитационной модели движения КА.

Список литературы

1. Потюпкин А.Ю., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 3. С. 11–19.
2. Потюпкин А.Ю., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 3. С. 61–70.
3. Жодзишский А.И., Жидкова С.К., Нагорных Д.Н. Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 4. С. 14–21.
4. Первый спутник для системы «Марафон IoT». <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-290523> (Дата обращения 18.07.2023.)
5. СТО ГК Роскосмос 1019-2019 «Аппаратура бортовая автоматических космических аппаратов. Информационное взаимодействие. Низкоскоростная радиолиния».
6. Спутниковая связь и вещание. Под ред. Л.Я. Кантора. М: Радио и связь, 1997. 521 с.
7. Регламент радиосвязи. 2016 г. <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.ru.601.pdf> (Дата обращения 14.07.2023 г.)
8. СТО ГК Роскосмос 1018-2019 «Аппаратура бортовая автоматических космических аппаратов. Информационное взаимодействие. Высокоскоростная радиолиния».

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.07.2023

Дата принятия рукописи
в печать 28.08.2023