

В статье рассматриваются проблемы космического мусора и анализируется актуальность создания системы контроля и управления нано- и микроспутниками. Показано, что такая система может быть реализована на основе ретрансляции информации через релейные спутники с высотой орбиты 1400–1500 км (например, с использованием модернизированных спутников низкоорбитальной системы “Гонец” с высотой орбиты 1500 км) в полосах частот диапазона UHF или L-диапазона, выделенных для организации межспутниковых радиолиний. При необходимости межспутниковые каналы контроля и управления могут использоваться для низкоскоростной передачи информации, например в спутниковой системе “Марафон IoT” при решении задач глобального обслуживания на начальном этапе развития системы в условиях недостаточного наличия числа наземных станций сопряжения.

Потенциально система контроля и управления многочисленными нано-/микроспутниками на основе ретрансляции информации через спутники типа “Гонец” может иметь международный характер и коммерческую основу функционирования

Анализ актуальности и реализуемости системы контроля и управления низкоорбитальными нано- и микроспутниками

Analysis of the relevance and feasibility of the control and management system for low-orbit nano/micro satellites



Валентин Анпилов

Заместитель генерального директора
АО “ВИСАТ-ТЕЛ”, к.т.н.



Андрей Гриценко

Генеральный директор
АО “Информационный Космический
Центр “Северная Корона”, к.т.н.

Одной из современных тенденций в мировой космической отрасли является активное создание нано- (1–10 кг) и микроспутников (11–100 кг) в интересах решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) или задач передачи информации (спутниковый Интернет вещей, АЗН-В, АИС). Как правило, в интересах ДЗЗ и систем передачи данных создаются многоспутниковые низкоорбитальные группировки. Но эта тенденция охватывает также технологические и научные задачи, решение кото-

74 **Динамика наращивания запусков низкоорбитальных спутников массой до 500 кг (данные NSR 2019 г.)**

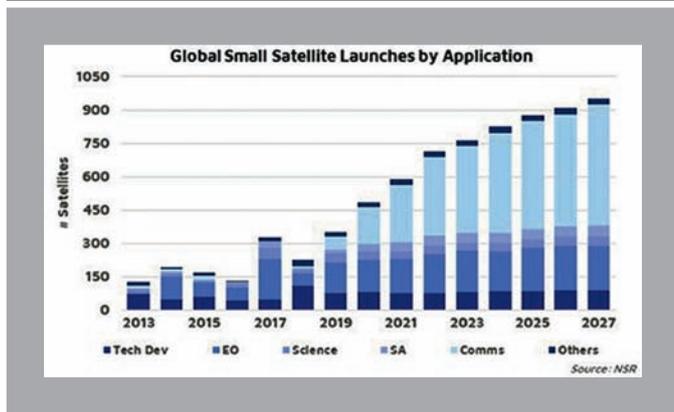


Рис. 1

рых, как правило, осуществляется путем запуска единичных наноспутников.

Кроме того, заявлено огромное количество мини-спутников (100–500 кг). К этому классу относятся многоспутниковые группировки Starlink, OneWeb и им подобные системы типа LEO-HTS, ориентированные на предоставление широкополосного доступа.

В данном случае при градации спутников по массе принята классификация NASA [1, 2].

В публикациях к понятию малых спутников (Small Satellite) обычно относят спутники с массой до 500 кг. Прогнозируемое количество таких Small Satellite, выводимых на низкие орбиты, исчисляется тысячами в год в период 2025–2030 гг. А если сложить все спутники типа LEO-HTS, заявленные в проектах Starlink, OneWeb, то сумма составит несколько десятков тысяч. Конечно, реальная количественная оценка планируемых спутников затруднительна, поскольку реализация всех проектов LEO-HTS не только сомнительна [3, 4], но и абсурдна. Но все без исключения исследования подтверждают, что количество спутников на низких орбитах в диапазоне высот 500–1200 км будет очень большим (даже если исключить из рассмотрения системы LEO-HTS). Например, по прогнозам NSR, уже в 2027 г. число запущенных спутников составит почти 1000 шт. (<http://www.satnews.com/story.php?number=729104513>).

Причем распределение спутников с учетом систем LEO-HTS будет при-

мерно таким, как показано на рис. 2.

Особый интерес в данном случае представляют спутники типа “нано” и “микро”, которые имеют ограниченные возможности по их коррекции на орбите и организации управления и контроля. Особенно это относится к

единичным наноспутникам. Причем количество таких спутников составляет примерно 50% от указанного на рис. 1. Следует учитывать, что гарантированный срок активного существования спутников на низких орбитах составляет не более 5–7 лет, а для наноспутников обычно не превышает и 1–2 года. Но физически спутники как космический мусор могут существовать на орбите до 600 км десятки лет, а на орбите более 1000 км – уже сотни лет, то есть количество мусора со временем будет резко нарастать. Естественно, и вероятность столкновения спутников будет увели-

Прогнозируемое распределение классов низкоорбитальных спутников



Рис. 2

ваться, что вообще может привести к фатальным последствиям в околоземном пространстве, например при столкновении спутников и последующей за этим цепной реакции столкновений.

Космический мусор сегодня отслеживается с использованием наземных радиолокаторов и оптическими средствами. Такие системы имеются в США, в Китае и в России в распоряжении военных структур. На рис. 3 показано расположение узлов сети космического слежения США [5]. Потенциальная разрешающая способность радиолокационной системы обеспечивает обнаружение

Сеть наземных узлов слежения США за космическими объектами

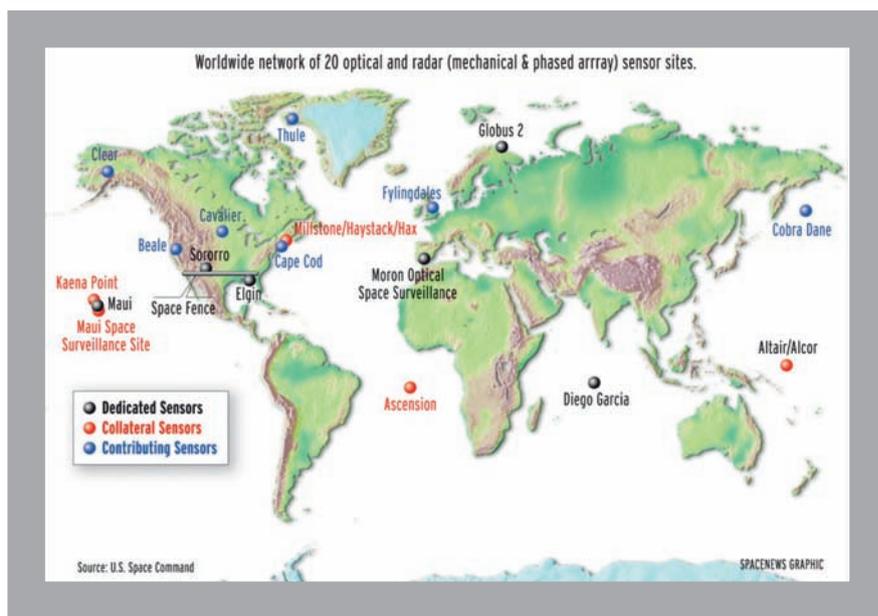


Рис. 3



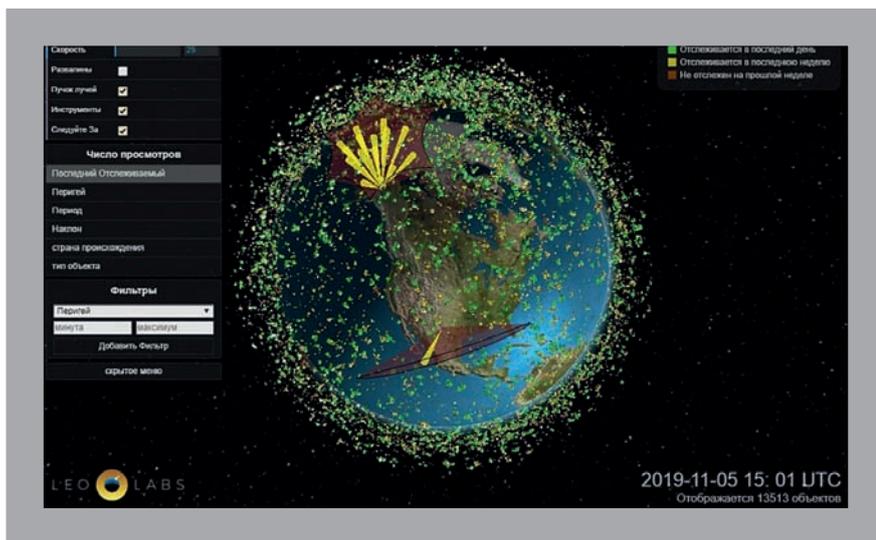


Рис. 4

космических объектов на низкой орбите (предположительно до 600 км) с размерностью до 0,25U (примерно 10x10x0,25 см). Показательным является то, что спутники SpaceBEE (размерность 0,25U) многоспутниковой группировки системы Swarm пришлось “облепить” специальным радиоотражающим покрытием для их большей заметности и оснастить приемником GPS для получения координат по запросу с Земли. В апреле 2018 г. в США началось обсуждение задачи коммерциализации военной системы слежения за космическим мусором [6]. Предлагается снять эту задачу с Пентагона и передать ее в Министерство торговли США. При этом все имеющиеся технические ресурсы и каталоги должны были быть объеди-

нены. Но еще в 2015 г. частная компания LeoLabs (<https://www.leo-labs.space/>) вышла на этот рынок с коммерческими услугами. Сегодня в распоряжении компании имеется три многолучевых радиолокационных узла слежения. Стоимость услуги слежения за спутником составляет \$4000 в месяц, а при заключении договора на 12 месяцев цена снижается до \$2000 за спутник. Для многоспутниковых группировок предусмотрены договорные скидки. Услуга позволяет прогнозировать траекторию орбиты и вероятность столкновения спутников. Обновление данных в лучшем случае производится один раз в сутки, поскольку радиолокационная зона ограничена относительно небольшим угловым сектором.

Представленный краткий обзор проблематики космического мусора показывает, что задача контроля и управления нано- и микроспутниками является актуальной не только для решения этой целевой задачи, но и для минимизации рисков фатального увеличения космического мусора в перспективе. При этом, потенциально, данная задача может иметь коммерческую составляющую.

Кроме того, анализ проблематики космического мусора показывает, что требуются новые нормативные правила эксплуатации многоспутниковых группировок, обеспечивающие в перспективе минимизацию космического мусора и последствий его воздействия на экологию космического пространства. Таким образом, должны предусматриваться как нормативные ужесточения по условиям утилизации отработавших спутников, так и меры по их контролю и управлению в процессе работы.

Система контроля и управления низкоорбитальной группировкой

Создать глобальную систему контроля и управления для нано- и микроспутников можно на основе относительно небольшой группировки спутников на круговых орбитах с предельно большой высотой для низкоорбитальных систем (примерно 1500–2000 км).

Для конкретики численных оценок моделирования примем баллистические параметры системы “Гонец” (высота орбиты 1500 км). Тем более, что в планах ГК “Роскосмос” заявлено о ее модернизации к 2025 г. (https://www.gonets.ru/rus/media/news/sozдание_perspektivnoy_sistemy_sputnikovoy_svyazi_v_planakh_gk_roskosmos/ и расширения функциональных задач (https://www.glonass-iac.ru/content/news/?ELEMENT_ID=876, <https://tass.ru/kosmos/6522009>). Иллюстрация системы контроля и управления нано- и микроспутниками с использованием в качестве релейных спутников системы “Гонец” представлена на рис. 5. В данном случае нужны узкополосные межспутниковые радиолнии, поскольку достаточно обеспечивать передачу информации со скоростью максимум 10 Кбит/с для снятия телеметрии с нано-/микроспутников

Полосы частот межспутниковых радиолний ниже 6 ГГц

Полоса частот, МГц	Радиослужба	Примечания
410–420	Космических исследований (с учетом примечания 5.268)	Регионы 1, 2, 3. В США только ПР*
1164–1300	Радионавигационная спутниковая	Регионы 1, 2, 3. В России только ПР. В США применяется только 1164–1240 МГц
1559–1610	Радионавигационная спутниковая	Регионы 1, 2, 3
2025–2110	Космических исследований	Регионы 1 2 3. В США только ПР.
2200–2290	Космических исследований Космической эксплуатации	В России только ПР. Полоса частот 2202,4–2222,9 МГц используется для межспутниковых радиолний в системе ГЛОНАСС
5010–5030	Радионавигационная спутниковая	Регионы 1, 2, 3. В России только ПР

* ПР – правительственного назначения.

Таблица 1

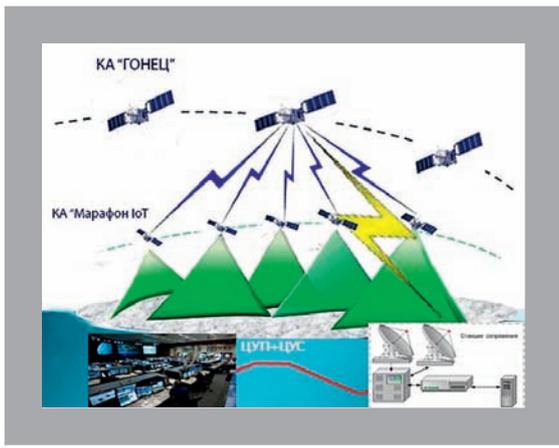


Рис. 5

стороны РЭС наземных фиксированных и подвижных служб. В качестве таких РЭС в SA.2162 приняты наземные станции сети подвижной связи с ЭИИМ до 32 дБВт в полосе 16 кГц для базовых станций и до 25 дБВт в 16 кГц для мобильных. Показано, что при уровне помехи -140 дБВт/МГц на входе изотропной антенны (усиление 0 дБи) практически не ощущается ее мешающее воздействие для работы РЭС МКС [7].

Наиболее предпочтительным для системы контроля и управления нано-

и микроспутниками является диапазон 410–420 МГц, поскольку для каналообразования может быть применена технология LoRa. Для реализации такого решения имеется элементная база, например, чипы SX1276-1278 (выходная мощность в линейном режиме 25 мВт, в насыщении до 100 мВт при потреблении менее 0,45 Вт). При этом про-

граммными средствами могут быть установлены диапазоны частот, полосы частот каналов, излучаемая мощность и требуемый коэффициент расширения (SF). Максимальный объем полезной информации в одном пакете от 1 байта до 255 байт. По сути, применение технологии LoRa позволяет реализовать идею “гибкой полезной нагрузки спутника”. Например, для снижения уровня создаваемых помех имеется возможность дискретно снижать мощность передатчика и/или уменьшать дискретность передачи пакетов, переназначать полосы частот и частотные номиналы каналов, изменять параметры сигнальной кодовой последовательности. Достигается “гибкость” за счет полной обработки сигнала и его регенерации на борту.

Энергетика радиолиний

Для оценки энергетики межспутниковых радиолиний прием параметра приемопередающего модуля, устанавливаемого на нано- или микроспутнике (таблица 2), исходя из условия, что его потребление должно быть не более 0,5 Вт, а масса не более 0,3 кг.

Параметры приемопередающего модуля нано-/микроспутника

Параметр	Значение	Примечание
Диапазон частот, МГц	410-420	
Мощность передатчика, Вт		
максимум	0,1	Ограничение цикличности 1%
минимум	0,05	Нет ограничения
Усиление антенны, дБи		
максимальное	0	Поляризация круговая, при низких углах вырождается в линейную
минимальное	-6	
Температура шума, К	740	Без учета шумов антенны
Полоса частот канала, кГц	250	Диапазон изменения 7,8 Кбит/с...500 Кбит/с
СКК канала	LoRa	C/N = -5 дБ...-20 дБ

Таблица 2

Параметры приемопередающего модуля релейного спутника

Параметр	Значение	Примечание
Диапазон частот, МГц	410-420	
Число лучей	4	В секторе примерно 150x150 град.
Мощность передатчика луча, Вт	0,1	На входе антенны
Усиление антенны, дБи		
максимальное	+8	Поляризация круговая
минимальное	+4	
Температура шума, К	1200	С учетом шумов антенны
Полоса частот канала, кГц	250	
СКК канала	LoRa	C/N = -5дБ...-20дБ

Таблица 3

и достаточно несколько Кбит/с для подачи команд. При этом передача данных может быть цикличной, то есть не требуется непрерывной передачи информации.

Для реализации низкоскоростных межспутниковых радиолиний целесообразно использовать диапазоны частот ниже 6 ГГц, что существенно упрощает реализацию аппаратуры и обеспечивает их достаточный энергетический потенциал (таблица 1). Анализ диапазонов, указанных в таблице 1, показывает, что каждый из них имеет свои особенности применения для задачи контроля и управления низкоорбитальными нано- и микроспутниками с учетом применения радиоэлектронных средств (РЭС) разнообразных служб, предусмотренных в этих диапазонах. Например, в диапазоне 1164–1300 МГц расположены навигационные сигналы, но имеются относительно доступные участки, например полоса частот 1294–1300 МГц (выше сигнала E6 системы Galileo).

В диапазоне частот 410–420 МГц работают РЭС международной космической станции МКС [7]. Высота орбиты МКС от 333 до 460 км с наклоном до 60 град. Отметим, что ограничение на дальность межспутниковой радиолинии 5 км, которое ранее имелось в примечании 5.268 РР в 2016 г., снято. Однако сохранено условие, что уровень плотности потока мощности на поверхности Земли в надире допускается не более -153 дБВт/кв. м в любой полосе частот 4 кГц. При этом не предполагается защита от помех со



Энергетика радиолинии и скорость канала телеметрии (исходные данные приведены в таблицах 2 и 3)

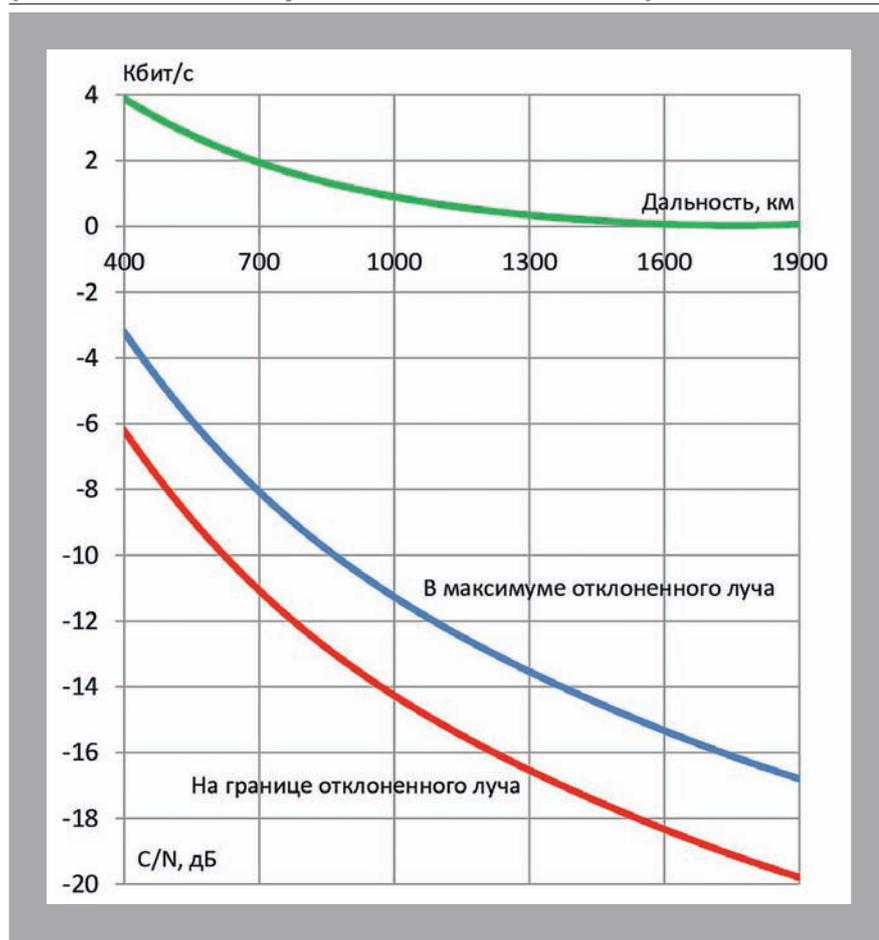


Рис. 6

Временные периоды контакта с нано- и микроспутниками

Поскольку число спутников «Гонец» невелико, то наклонные дальности до нано-/микроспутника могут существенно превышать допустимые дальности межспутниковых радиолиний, которые следуют из расчета их энергетики.

В качестве примера смоделируем следующую ситуацию. Развернем спутник на орбите высотой, например, 850 км и наклонением 89 град. Плоскость орбиты спутника устано-

Энергетика радиолинии канала управления (исходные данные приведены в таблицах 2 и 3)

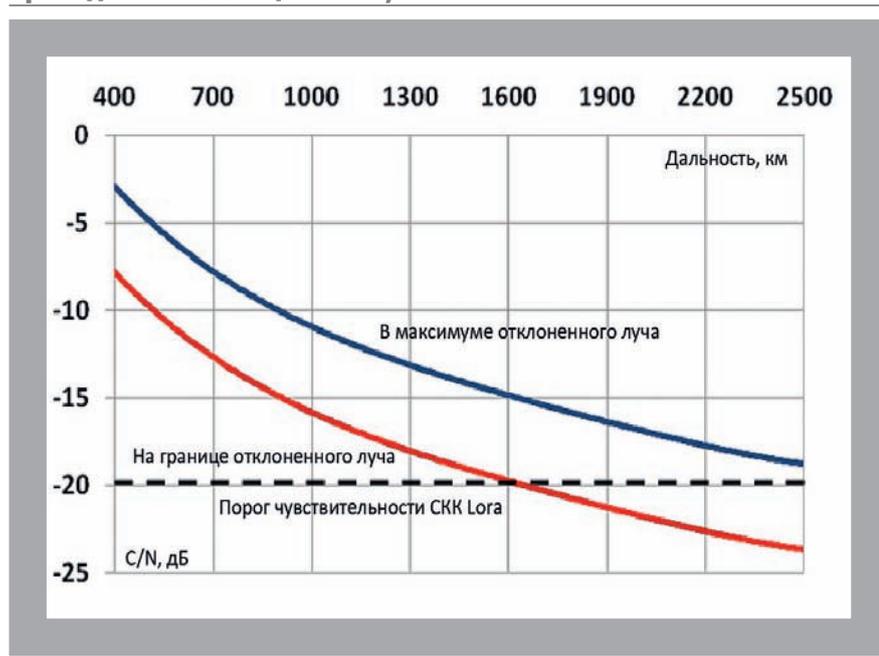


Рис. 7

Система «Гонец» и микроспутник

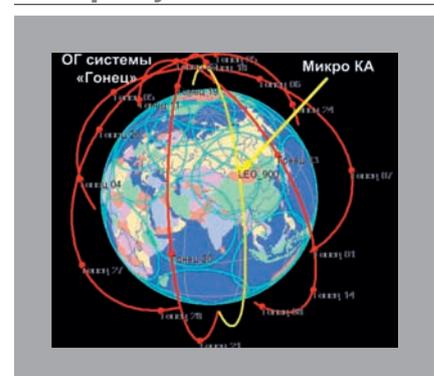


Рис. 8

78 вим между орбитальными плоскостями группировки системы “Гонец”. Поясняющая картинка представлена на рис. 8.

Графики изменения дальности между микроспутником и ближайшими КА системы “Гонец” представлены на рис. 9.

Как следует из рис. 9, серия сеансов связи на минимальной дальности происходит в приполярных районах. Действительно, по мере приближения к приполярным областям концентрация спутников системы “Гонец” возрастает и, соответственно, растет вероятность пересечения их подспутниковых точек, при котором обеспечивается минимальная дальность. Следовательно, временной интервал между сериями возможных сеансов связи для спутников на орбитах с наклонением от 80 град. и выше составит половину значения периода обращения. При высоте орбиты 850 км период обращения равен примерно 1,7 часа, следовательно условия для организации межспутниковой линии будут формироваться каждые 50 мин. Но если принять во внимание, что само временное окно возможных сеансов связи имеет продолжительность около 10 мин, то интервал между сеансами связи сокращается до 40–45 мин.

Аналогичная ситуация складывается и при движении микроспутника по солнечно-синхронной орбите (ССО). Соответствующие графики представлены на рис. 10.

Анализ группировок КА на низких орбитах показал, что подавляющая часть (более 80%) спутников движется на орбитах с наклонением более 45 град. Поэтому проведем оценку ситуации для случая, когда наклонение орбиты микроспутника будет существенно меньше 83 град., например, 45 град. Графики изменения линейной дальности при наклонении 45 град. представлены на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что характерная “пакетность” сеансов связи исчезла. Наблюдается относительно равномерное распределение временных интервалов для организации межспутниковой связи. Промежутки времени между сеансами при ограничении по максимальной дальности в 1600 км составляют примерно 20–30 мин.

Снижение высоты орбиты микроспутника до 550 км привело только к увеличению минимальной дальности

Изменение дальности между микроспутником на приполярной орбите высотой 850 км и КА ОГ системы “Гонец”

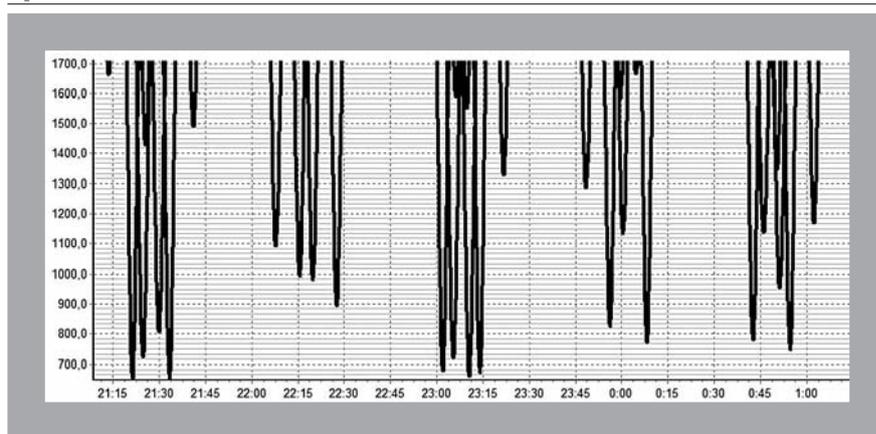


Рис. 9

Изменение дальности при положении микроспутника на солнечно-синхронной орбите высотой 850 км с наклонением 97,936 град.

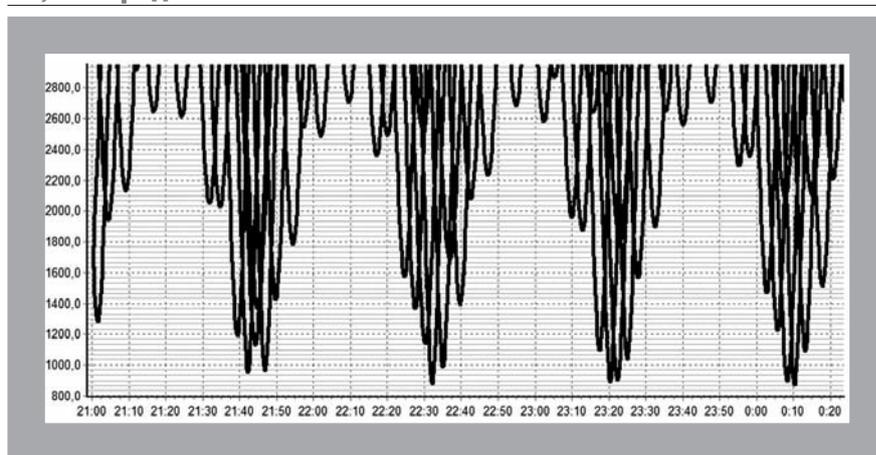


Рис. 10

Изменение дальности между микроспутником с высотой орбиты 850 км и наклонением 45 град. и КА ОГ системы “Гонец”

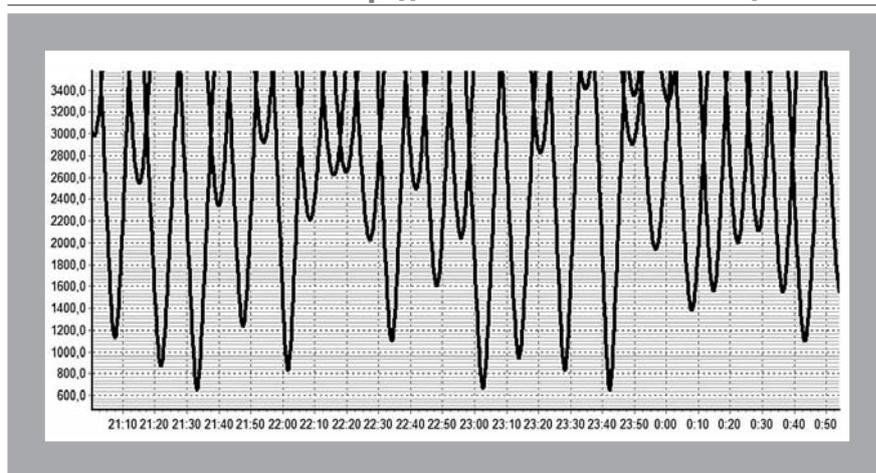


Рис. 11



Изменение дальности между микроспутником с высотой приполярной орбиты 550 км и КА ОГ системы “Гонец”

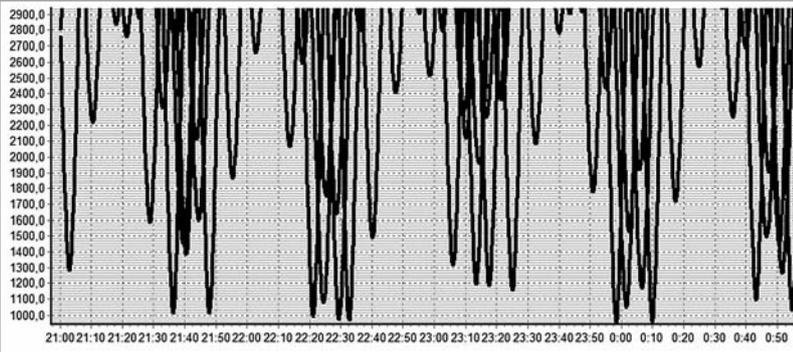


Рис. 12

Изменение дальности между микроспутником с высотой приполярной орбиты 1450 км и КА ОГ системы “Гонец”

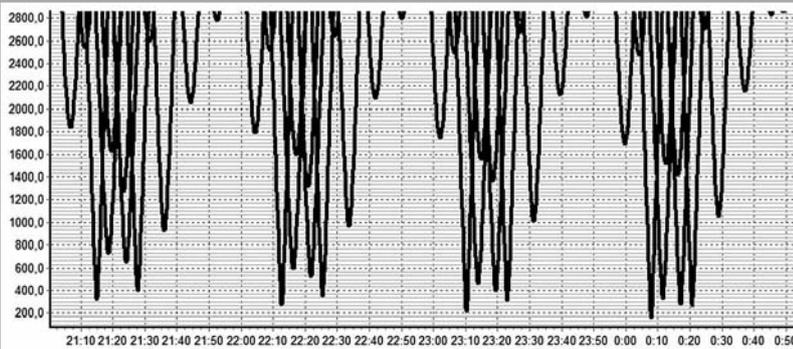


Рис. 13

Мгновенные зоны радиодоступности КА системы “Гонец”

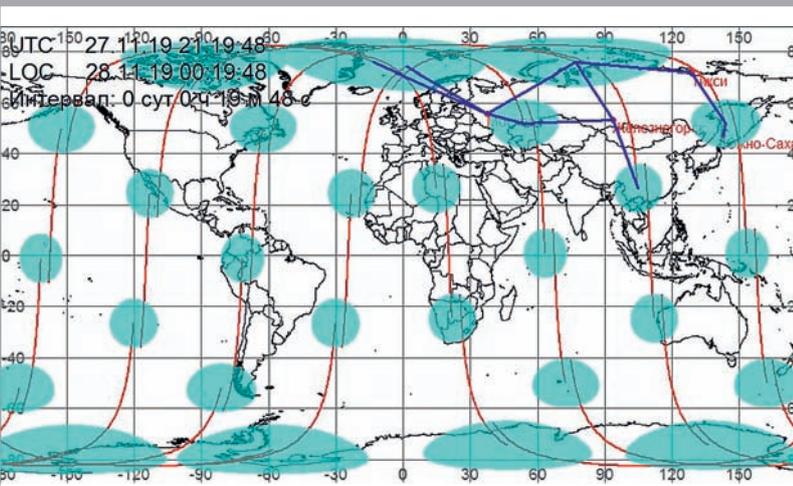


Рис. 14

сти до 950 км. Типовой график изменения дальности при работе во временном “окне” с одним из КА системы “Гонец” представлен на рис. 12.

Графики изменения дальности при высоте приполярной орбиты 1450 км представлены на рис. 13. По аналогии с зонами радиовидимости наземного комплекса управления на рис. 14 представлены мгновенные зоны радиодоступности спутников системы “Гонец” для микроспутников. Они интерпретируются следующим образом: при прохождении траассы (подспутниковой точки) микроспутника через зону радиовидимости КА системы “Гонец” между ними может быть организован канал передачи данных (требования по энергетике выполняются).

Необходимо отметить, что для передачи полученных от микроспутника данных на Землю необходимо, чтобы КА “Гонец” сам находился в зоне радиовидимости шлюзовой земной станции. На рис. 14 показано положение шлюзов на территории России (Москва, Железногорск, Южно-Сахалинск и Тикси), а синими линиями обозначены фидерные линии обслуживаемых КА “Гонец”. Как видно из рисунка, в представленный момент времени в зоне радиовидимости наземного комплекса находились только шесть КА “Гонец”.

Таким образом, контакт с нано- или микроспутниками не может быть непрерывным. Передача данных телеметрии и команд управления по межспутниковым линиям связи осуществляется сеансами. Длительность сеансов от 2–3 до 10 мин с перерывами от 20 до 45 мин в зависимости от высоты и наклона орбиты нано-/микроспутника.

Уровни помех

На рис. 15 представлена оценка совокупного уровня помех, которые генерируются нано-/микроспутниками в направлении РЭС МКС в диапазоне 410–420 МГц при условии непрерывной работы четырех передатчиков, поскольку диаграмма направленности занимает практически всю верхнюю полусферу. При этом принято защитное отношение (разница между максимальным усилением антенны нано-/микроспутника в направлении релейного спутника и в направлении МКС) минимум 10 дБ. Из оценок, представлен-

80 Оценка уровня помехи, создаваемой передатчиками телеметрии нано-/микроспутников, для РЭС МКС в диапазоне 410–420 МГц

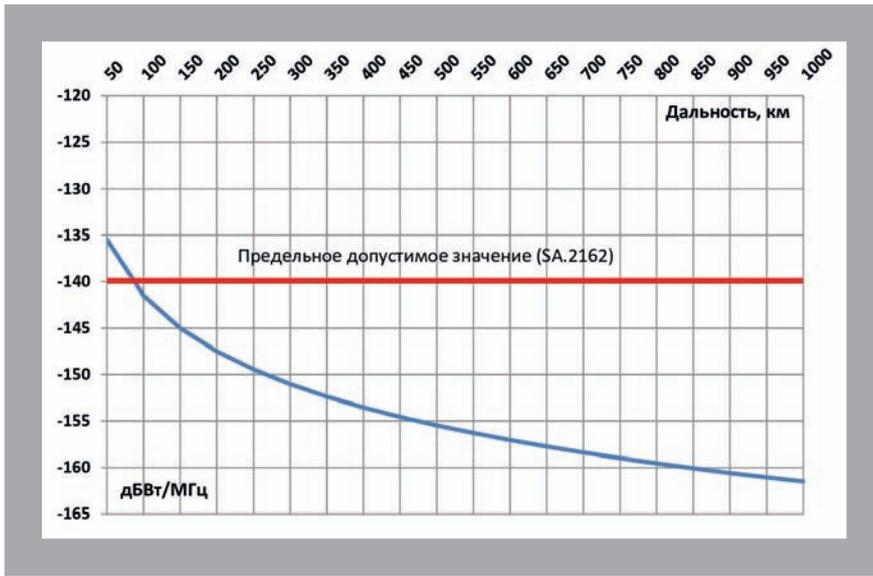


Рис. 15

Максимальный уровень помехи для РЭС МКС, создаваемой сигналами управления, генерируемыми релейным спутником

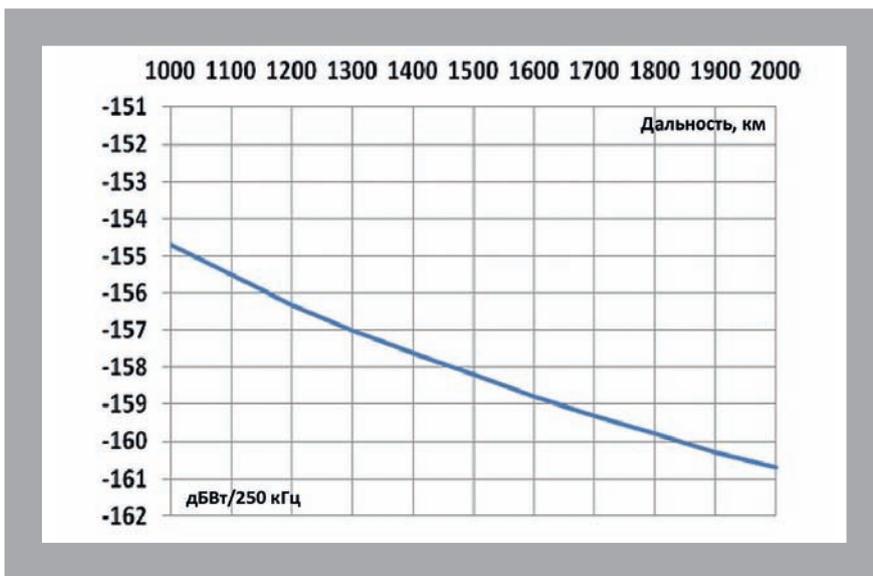


Рис. 16

ных на рис. 8, следует, что требуется обеспечить минимальную дальность между МКС и нано- и микроспутниками не менее 90 км. Соответственно, высота орбит нано- и микроспутников в данном случае должна быть более 550 км. Здесь не учтена дополнительная развязка по поляризации, которая может составлять примерно 3 дБ. Кроме того, за счет дополнительного малонаправленного экрана

можно увеличить защитное отношение примерно до 16 дБ (требуются дополнительные экспериментальные исследования). Таким образом, ограничение высоты орбиты нано- и микроспутников в 550 км является условным ограничением. Релейный спутник также может создавать помеху в направлении МКС. Но минимальная дальность линии ее распространения от релейного спутника до МКС составляет при-

мерно 1000 км. При этом достаточно учитывать сигнал только от одного релейного спутника, который генерирует помеху в полосе 250 кГц. На рис. 16 представлена оценка уровня помехи, создаваемой релейным спутником в направлении МКС. Как следует из данных рис. 16, максимальный уровень этой помехи более чем на порядок ниже допустимого уровня -140 дБВт/МГц [7].

Развитие системы

При условии реализации предлагаемой системы контроля, а именно сбора данных с интервалом по времени около 50 мин о координатах и времени положения десятков и сотен разнообразных (по массе и площади Миделя) КА, расположенных в высотном поясе примерно от 550 до 1450 км, может быть сформирован доступный в том числе для научных и учебных заведений банк данных с результатами контроля.

Наличие такого банка дает основу для выполнения работ научного и исследовательского характера по уточнению основных параметров атмосферы Земли и влияния на нее активности Солнца, аномалий гравитационного поля Земли, а также уточнения и верификации детальных моделей прогноза движения космических объектов. В совокупности это позволит повысить как безопасность, так и, при определенных условиях, эффективность эксплуатации космических средств. Кроме того, с использованием данной системы можно не только принимать телеметрию со спутников ДЗЗ, но и подавать команды целеуказаний для их целевой аппаратуры.

Выводы

Предварительные исследования показывают, что на основе модернизируемой низкоорбитальной системы “Гонец” имеется возможность создать глобальную систему контроля и управления нано-/микроспутниками, расположенными на орбитах в интервале высот от 550 до примерно 1450 км. В этой системе КА “Гонец” выступают в качестве релейных спутников.

Наиболее удобен диапазон частот 410–420 МГц, поскольку для реализации ретрансляционной аппаратуры каналов межспутниковой связи имеется возможность применить технологию и элементную базу LoRa.



Анализ показывает, что сеансы связи для снятия телеметрии и подачи команд управления не могут быть непрерывными. Их частота зависит от высоты орбиты нано-/микроспутника и ее наклона. В большинстве случаев окно сеанса связи составляет от 2–3 до 10 мин при частоте их повторения от 20 до 45 мин.

Кроме того, в большинстве случаев сеансы связи проходят в высокоширотных областях Земли, где информация может быть передана на действующую сеть наземных шлюзов системы “Гонец” на территории России.

При этом сигналы телеметрии и управления межспутниковых радиолиний не создают мешающих помех для работы станции МКС. Рассмотренная система контроля и управления нано-/микроспутниками может иметь более широкое

назначение, в том числе для решения научных задач и задач управления спутниками дистанционного зондирования Земли.

Литература

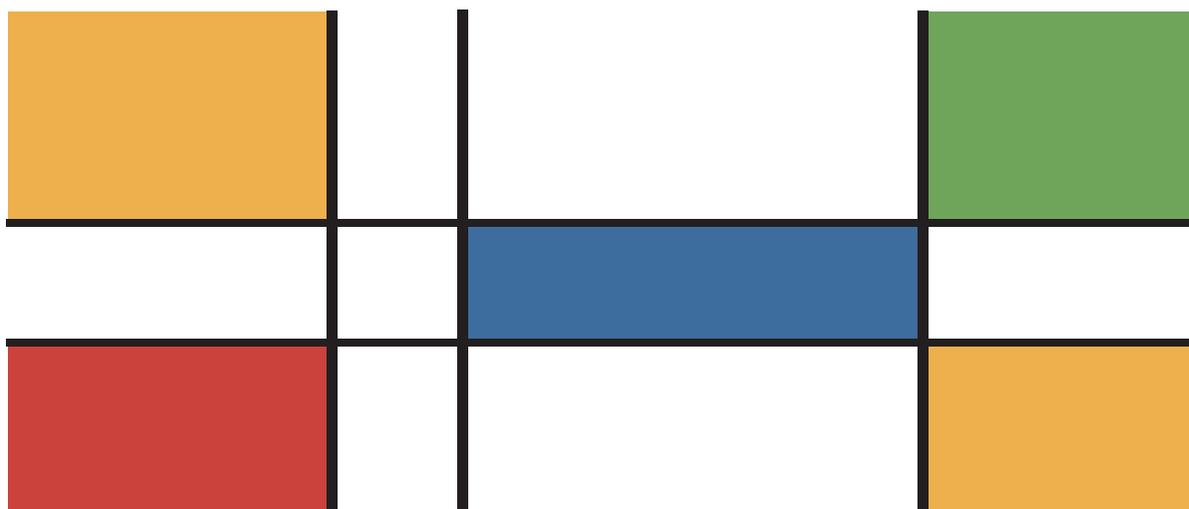
1. Анпилогов В.Р. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // Технологии и средства связи. — 2015. — № 4. — С. 62–67.
2. State of the Art Small Spacecraft Technology: NASA/TP–2018–220027, NASA Ames Research Center, Small Spacecraft Systems Virtual Institute. — December, 2018.
3. Анпилогов В., Гриценко А. Анализ многолучевой рабочей зоны спутников OneWeb // Технологии и средства связи / Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2017”. — 2016. — № 6 (2). — С. 78–86.

4. Анпилогов В., Гриценко А., Чекушкин Ю., Зимин И. Результаты анализа совместной работы систем OneWeb и “Экспресс-РВ” в Ku-диапазоне // Специальный выпуск. Каталог “Спутниковая связь и вещание – 2019”. — 2018. — С. 48–54.
5. Юфеев С. От “Системы контроля космического пространства” не ускользнет ни один спутник // Военное обозрение, 08 апреля 2015, <https://topwar.ru/72587-ot-sistemy-kontrolya-kosmicheskogo-prostranstva-ne-uskolznet-ni-odin-sputnik.html>.
6. Sheetz M., VP Pence: Commerce Department will oversee new space debris policy, CNBC, 16.04.2018.
7. SA.2162, Sharing conditions between space research service extra vehicular activities (EVA) links and fixed and mobile service links in the 410–420 MHz band.

ТБ ФОРУМ
Международный
Технологии Безопасности

ФЕВРАЛЬ 2021
КРОКУС ЭКСПО

БЕЗОПАСНЫЙ ГОРОД • БЕЗОПАСНОСТЬ НА
ТРАНСПОРТЕ • НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ •
ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ И СВЯЗИ • АНТИТЕРРОР •
ДОСМОТР • ОХРАНА ПЕРИМЕТРА И ОГРАЖДЕНИЯ •
БАНКОВСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ • ЭКОНОМИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ • ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ •
БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И
ЭНЕРГЕТИКИ • БЕЗОПАСНОСТЬ РИТЕЙЛА •
БЕЗОПАСНОСТЬ СПОРТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ



Groteck
Business Media

БЕСПЛАТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ НА WWW.TBFORUM.RU



Реклама