

В статье приводятся результаты имитационного моделирования низкоорбитальной системы спутниковой связи на примере системы "Гонец" с учетом ее орбитального построения. Производится оценка пространственной доступности космических аппаратов и оперативной готовности космического сегмента системы связи. Анализируется влияние формируемого орбитальной группировкой покрытия на расположение земных станций. Результаты представлены в виде графиков и картографических распределений, позволяющих сопоставить их с потребностями различных категорий абонентов.

П р о с т р а н с т в е н н а я д о с т у п н о с т ь и о п е р а т и в н а я г о т о в н о с т ь н и з к о о р б и т а л ь н о й г р у п п и р о в к и к о с м и ч е с к и х а п п а р а т о в с в я з и

Volumetric availability and readiness of low earth orbit communication constellation



Александр Акимов,
главный специалист ЦНИИЭИСУ

Aleksandre Akimov,
chief specialist, CSRI of economics
informatics and management systems



Виталий Полецук,
начальник отдела ЦНИИЭИСУ

Vitaly Poleshchuk,
head of Department, CSRI of economics
informatics and management systems

Results of limitation modelling of the low earth orbit constellation are shown in this article. The modelling were done based on the Gonets constellation with it's orbital structure in mind. Also the volumetric accessibility of the spacecrafts and readiness of the space segment estimations are made. Along those subjects analyses of the footprints and interaction of the space system with earth stations are done. The results are present as a graphs and map distributions that allow compare them with different user categories.

В процессе технического проектирования систем спутниковой связи широко используются методы анализа пространственной доступности космических аппаратов (КА) для абонентов системы. Они позволяют построить зоны обслуживания и планировать размещение абонентов системы, гарантирующее предоставление им качественных услуг связи. Для КА, находящихся на геостационарной орбите, задача построения зон обслуживания была решена достаточно давно и подробно [1]. Пространственная доступность геостационарных КА была исследована в [2], а в работе [3] задача была решена для низкоорбитальной системы связи "Сигнал". Аналогичная методика анализа зон обслуживания низкоорбитальных систем связи ис-

Ключевые слова:
низкоорбитальные спутниковые системы, имитационное моделирование, система "Гонец"
Keywords: low-orbit satellite systems, simulation, system Gonets



пользовалась в работах [4, 5].

Однако существенным ограничением метода анализа, использованного в работах [2, 3, 4, 5], является то, что полученные в них результаты дают представление только о мгновенной пространственной доступности космических аппаратов для абонентов системы связи. Этот недостаток сильно сказывается в низкоорбитальных системах, КА которых быстро двигаются по орбитам, что не позволяет достоверно гарантировать непрерывную длительность радиоконтакта абонентов с созвездием КА. Произведем оценку качества взаимодействия ОГ КА с абонентами, учитывая требования к длительности радиоконтакта.

Для примера рассмотрим низкоорбитальную систему связи "Гонец", КА которой обеспечивают обработку заявок на обслуживание, поступающих от абонентов, и переносят принятые сообщения в сеть земных станций в соответствии с заданной дисциплиной обслуживания абонентов. Поэтому с точки зрения теории телетрафика [6] спутники "Гонец" необходимо рассматривать как набор подвижных узлов сети массового обслуживания, дополняющий земные узловые станции. В совокупности спутники и земные узловые станции образуют сеть массового обслуживания.

Предположим, что сеть мало насыщена абонентами, и не возникает ситуация отказа в обслуживании, связанная с полной занятостью КА. Тогда система, состоящая из КА и узловых земных станций, будет характеризоваться рядом показателей качества обслуживания, таких как:

- пространственная доступность КА для абонентов (связана со своевременностью передачи сообщений);
- оперативная готовность (связана с вероятностью, того что система в заданном интервале времени в состоянии выполняет свои целевые функции).

Структура орбитальной группировки и схемы организации связи в низкоорбитальной системе "Гонец"

В ходе работ по созданию системы "Гонец" рассматривались различные варианты построения орбитальной группировки. Учитывались требования технического задания и конструктивные ограничения, связанные с применением в используемых

Коэффициент пространственной радиодоступности созвездий спутников (%) в зависимости от широты

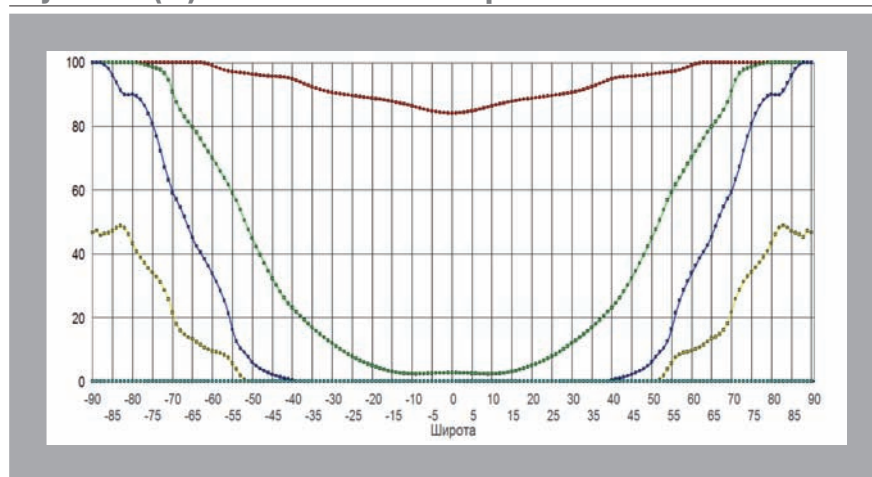


Рис. 1

Максимальное время ожидания (мин.) сеанса связи от широты

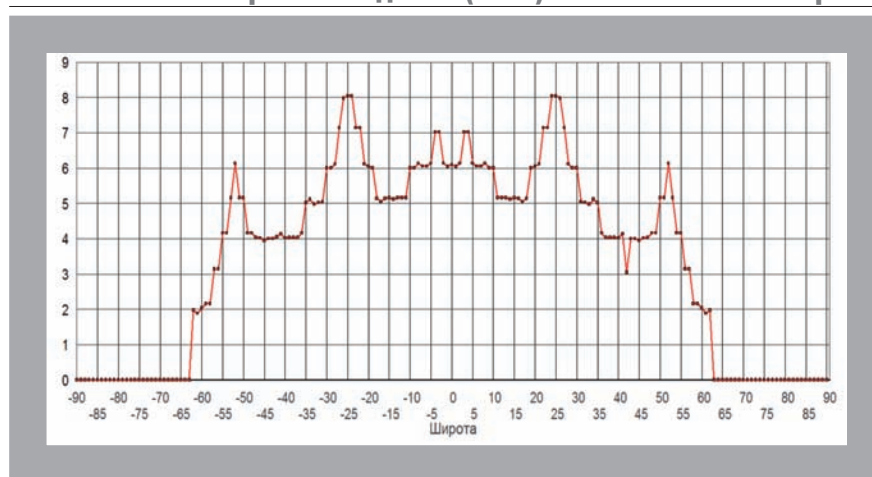


Рис. 2

Среднее время ожидания (мин.) сеанса связи от широты

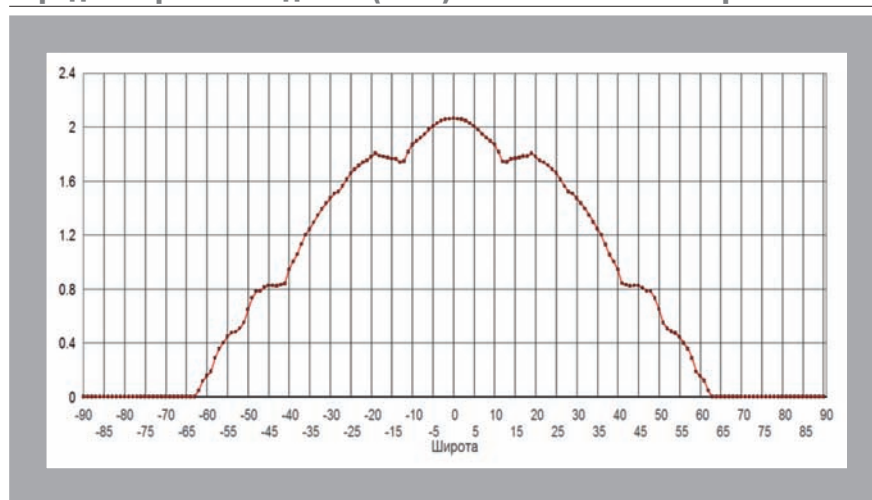


Рис. 3

78 Среднее время контакта спутника и земной узловой станции (мин.) в зависимости от широты

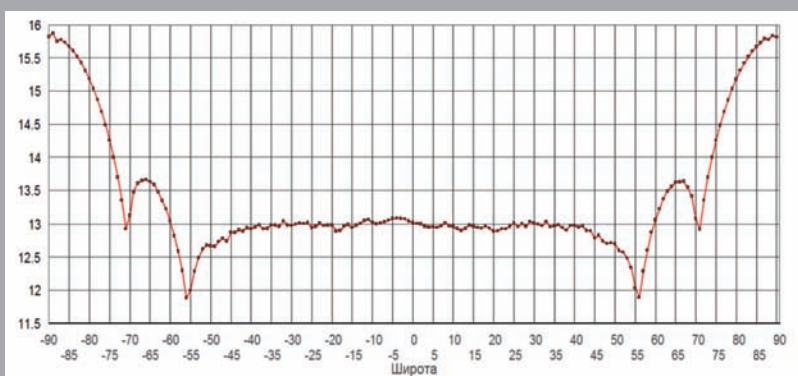


Рис. 4

Примеры изменения размеров областей пересечения зон радиовидимости спутника для моментов времени, отстоящих друг от друга на 1,5, 10 и 15 мин

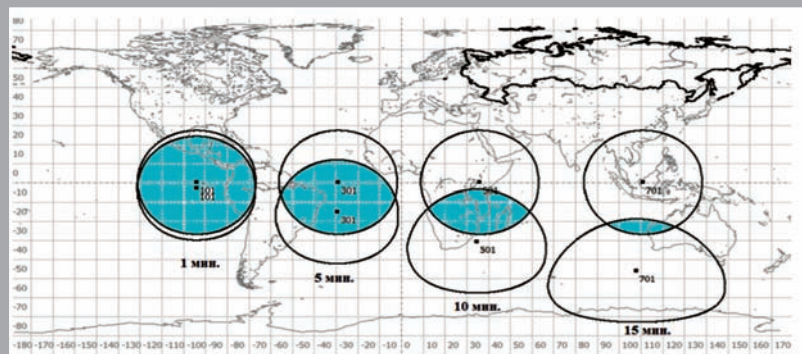


Рис. 5

Распределение зон радиовидимости спутников "Гонец", гарантирующее абонентам контакт в течении времени не менее 1 мин

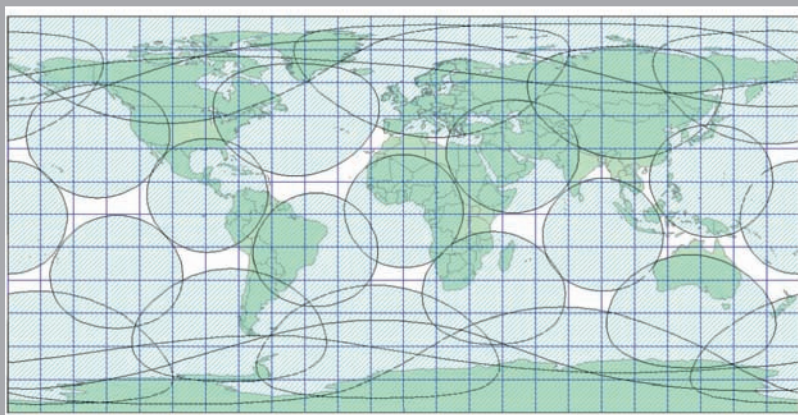


Рис. 6

космических аппаратах магнитной системы ориентации и гравитационной стабилизации [7, 8].

В результате был выбран класс орбит с наклоном 82,5 град., обусловленным используемой в космическом аппарате системой магнитной ориентации. Высота круговой орбиты составила 1500 км. Шаг разнесения орбитальных плоскостей по долготе восходящего угла составляет угол около 45 град. [7, 8]. Формат орбитальной группировки в итоге задан в виде 4 плоскостей по 6 спутников в каждой [8]. Для этих исходных данных была выполнена реконструкция орбитальной группировки, включающая синтез начальных условий, и проведен расчет движения всех 24 спутников с дискретностью 1 минута.

Имитационный эксперимент предусматривал определение числа событий, заключающихся в том, что для наблюдателей, расположенных в узлах мерной географической сетки на поверхности Земли, детектировалось возникновение созвездий спутников с углами места не меньше 10 град.

Дополнительно проводилось обнаружение событий, заключающихся в отсутствии спутников, видимых под углами больше 10 град., и анализировалась относительная частота их возникновений. На последнем этапе проводилось усреднение результатов по всем долготам мерной сетки и строились графики соответствующих распределений.

В системе "Гонец" предусмотрено два режима организации связи. В первом режиме, который условно назовем Online, взаимодействие абонентов с земными узловыми стационарными станциями (ЗУСС) организовано через спутник, находящийся в состоянии непосредственного радиоконтакта с ЗУСС. В этом режиме спутник образует локальную зону ответственности системы связи.

Во втором режиме, с условным названием Offline, работа абонентов организована через спутники, которые не находятся в состоянии непосредственного радиоконтакта с ЗУСС. В этом режиме сообщения от абонентов записываются в его бортовое запоминающее устройство и хранятся в нем до тех пор, пока они не будут доставлены на ЗУСС. При этом образуется глобальная зона ответственности системы. Сообщения, адресованные абонентам,



находящимся в глобальной зоне ответственности, сначала тем или иным способом поступают на ЗУСС, а затем переносятся в бортовом запоминающем устройстве спутника к абонентам.

Таким образом, координаты расположения ЗУСС будут существенно сказываться на вероятностно-временных характеристиках системы.

Пространственная доступность КА орбитальной группировки для абонентов, расположенных на поверхности земного шара

На рис. 1 показана зависимость коэффициента пространственной радиодоступности созвездий КА в зависимости от широты расположения земных станций (кривая красного цвета соответствует созвездию из одного КА, зеленая из 2, синяя из 3, желтая из 4. Созвездия более высокой кратности чем 4 никогда не реализуются).

Для системы связи "Гонец" рассматривалось несколько вариантов касающихся количества и размещения ЗУСС.

С помощью графиков рис. 1 можно понять, насколько часто над ЗУСС будет реализовываться ситуация полного отсутствия видимости спутников, доступных под углами места больше 10 град. Также можно понять, насколько часто будут появляться созвездия, состоящие из одного и нескольких спутников, доступных для ЗУСС.

График на рис. 2 показывает максимальную длительность ситуации отсутствия КА над одной из ЗУСС, которая составляет для рассматриваемого их расположения время $4 \div 6$ мин. Из рис. 3 видно, что средняя длительность отсутствия КА не превышает 2 мин.

Например, если расположить ЗУСС на широте 70 град. с.ш. (примерная широта расположения г. Тикси), с помощью графиков рис. 1, 2, 3 определим, что для нее доступность КА в любой момент времени равна 100%. Это, безусловно, будет положительно сказываться на вероятностно-временных характеристиках системы в целом при условии, что ЗУСС можно обеспечить эффективной привязкой к земной сети связи общего пользования, позволяющей ей обмениваться данными с другими ЗУСС.

Эффективность взаимодействия одиночного КА с ЗУСС можно ил-

Распределение зон радиовидимости для интервала времени 5 минут

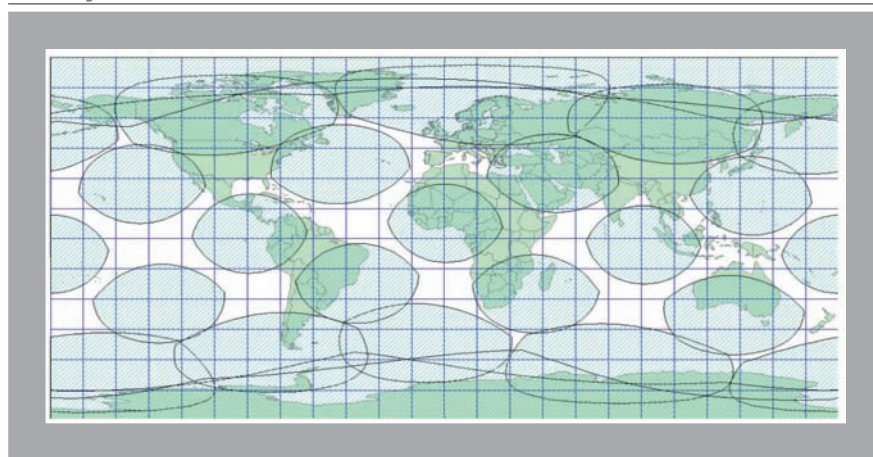


Рис. 7

Распределение зон радиовидимости для интервала времени 15 минут

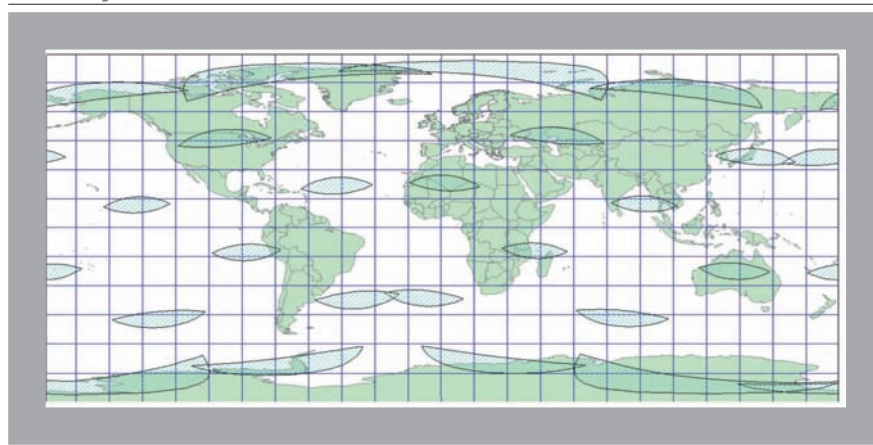


Рис. 8

Коэффициент оперативной готовности орбитальной группировки при гарантированном времени радиоконтакта с абонентом не меньше 5 минут

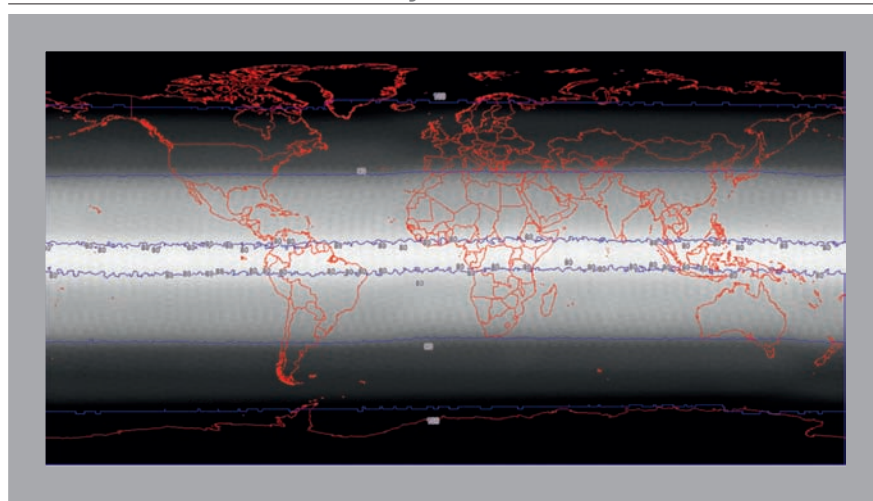


Рис. 9

люстрировать с помощью графика на рис. 4. На графике дана зависимость среднестатистического времени радиоконтакта одиночного КА с земными станциями от широты их расположения.

Оперативная готовность

Для оценки качества взаимодействия космического и земного сегментов будем использовать коэффициент оперативной готовности. В соответствии с ГОСТ 27.002–2009 [9], коэффициент оперативной готовности (Operating instantaneous availability) представляет собой вероятность того, что изделие в данный момент времени t_1 находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале времени (t_1, t_2) .

Соответственно, для абонентов таким изделием является система связи. Необходимым условием того, что КА в состоянии оказать услугу, заключающуюся в приеме от абонента (передачи абоненту) короткого сообщения является то, что абонент будет иметь сеанс связи с КА длительностью не меньше чем интервал $[t_1, t_2]$. В данном случае не предполагается разбивка сообщения на составные части. Именно по этому признаку будем называть сообщение коротким, то есть не требующим разбивки на части. Именно такая услуга заявлена в перечне услуг системы “Гонец”. В случае, когда отсутствует конкуренция абонентов за право доступа к ресурсам КА, можно считать, что условие радиоконтакта будет достаточным для возможности оказания такой услуги абоненту. Учитывая, что максимально возможное время радиоконтакта с КА с высотой орбиты 1500 км составляет около 17 мин., можно задать длительность короткого сообщения в пределах от 1 до 17 мин. Соответственно, вероятность контакта абонента со спутником, обеспечивающим сеанс связи длительностью хотя бы 1 мин, будет максимальна, а вероятность наличия над абонентом спутника, обеспечивающего длительность сеанса связи 17 мин., минимальна. На рис. 5 показано, как меняется размер общей области зон радиовидимости, гарантирующей абонентам, находящимся внутри нее, непрерывный радиоконтакт с

КА (высота орбиты 1500 км, наклонение 83,5 град.) на протяжении 1,5, 10 и 15 мин.

Для множества мерных точек, покрывающего поверхность Земли, можно получить оценку двумерного (по широте и долготе) распределения вероятности того, что абоненты, находящиеся в узлах мерной сетки, попадут в область гарантированной по времени радиовидимости одного и того же спутника. Статистика перекрытия таких зон при заданной кратности дает оценку двумерного распределения коэффициента оперативной готовности орбитальной группировки при условии, что ЗУСС видит как минимум один спутник. Проведенные расчеты для орбитальной группировки показывают, что требование гарантированного времени радиоконтакта абонента со спутником в течение хотя бы 1 мин не сильно ограничивает размер зон видимости на поверхности Земли (рис. 6). Поэтому можно считать, что результаты, полученные в иных источниках с использованием мгновенных зон, будут справедливы в предположении, что для абонентов гарантируется радиоконтакт со спутником в течение хотя бы 1 мин.

Распределение зон, гарантирующих длительную непрерывную радиовидимость в течение большего чем 1 мин времени принципиально изменяют ситуацию. Например, на рис. 7 и 8 приведены данные для интервалов 5 и 15 мин.

Из рисунков видно, что повышение требований к оперативной готовности космического сегмента до 5 мин заметно сокращает область покрытия поверхности Земли. При требовании непрерывной радиовидимости в течении 15 мин. происходит почти полная деградация покрытия.

Видимо, интервал времени 5 мин. можно принять за основу для получения распределения коэффициента оперативной готовности как заведомо меньший максимального времени радиовидимости.

Двумерное картографическое распределение коэффициента операторской готовности характеризующее способность КА в ОГ поддерживать непрерывный радиоконтакт с земными станциями в течении не менее 5 мин. показано на рис. 9. Полученные результаты позволяют заключить, что при полностью раз-

вернутой орбитальной группировке из 24 спутников абоненты системы могут с высокой степенью вероятности рассчитывать на 5-минутные сеансы связи. Следует отметить, что полученные данные практически полностью повторяют зависимости для доступности созвездия спутников (рис. 1), что естественно, поскольку интервал времени 5 мин. более чем в три раза меньше потенциально возможного времени радиоконтакта.

Зоны ответственности ЗУСС при работе системы связи в режиме “On-line”

Анализ доступности КА системы связи, учитывающий не только структуру орбитальной группировки, но и схему организации связи, и конкретное место расположения ЗУСС необходимо провести отдельно. Для этого рассмотрим области на поверхности Земли вокруг ЗУСС, где могут находиться абоненты при работе системы в режиме “On-line”. Полученные выше результаты говорят о том, что для орбитальной группировки из 24 КА на широте расположения ЗУСС (55 град. с.ш.) мгновенная доступность примерно равна 97–98%, а частота случаев отсутствия КА около 2–3%. Поэтому процесс работы абонентов будет характеризоваться периодическим отсутствием над абонентами КА находящихся в состоянии радиоконтакта с ЗУСС. Зададим максимально приемлемое время ожидания таких КА, например величиной 15 мин. Тогда проводя процесс имитационного моделирования и учитывая логическое правило, ограничивающее доступность для абонентов только теми КА, которые находятся в состоянии радиоконтакта с ЗУСС, расположенными в Москве, Железногорске и Комсомольске на Амуре получим соответствующие зоны ответственности показанные на рис. 10. При этом внутри зон будет гарантировано в 100% случаев доступность КА находящихся в состоянии радиоконтакта с ЗУСС, учитывая что время ожидания подлета таких КА к абонентам никогда не превысит 15 мин.

Необходимо отметить, что при выбранном расположении ЗУСС в Москве, Железногорске и Комсомольске на Амуре, как правило один КА будет одновременно доступен двум ЗУСС, одна из кото-



Зоны ответственности ЗУСС в Москве, Железногорске, Комсомольске на Амуре при времени не превышающем 15 мин. ожидания подлета к абонентам КА

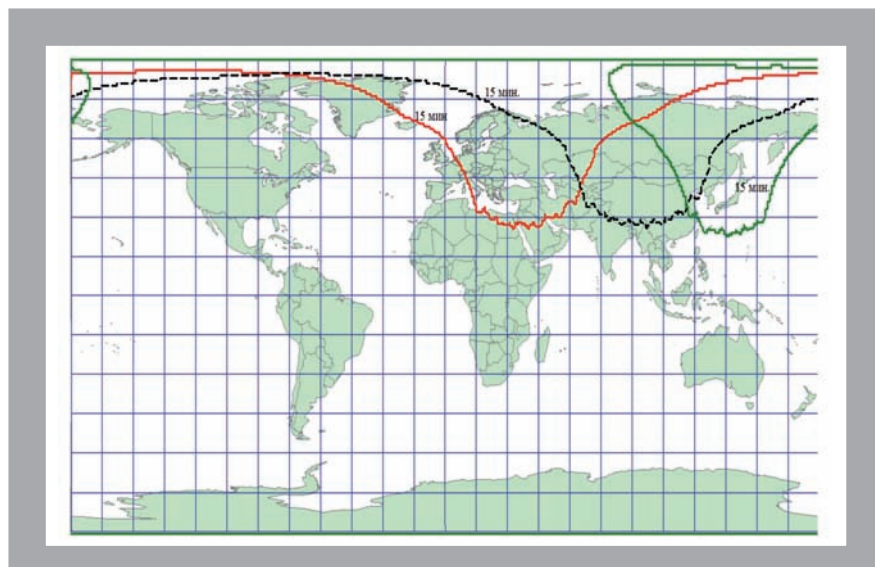


Рис. 10

рых с высокой долей вероятности (90%) будет расположена в Железногорске.

Заключение

Имитационное моделирование низкоорбитальной системы спутниковой связи позволяет провести анализ различных ситуаций и параметров. В данном случае моделирование выполнено на примере системы «Гонец» для оценки пространственной доступности и оперативной готовности космического сегмента системы.

В результате анализа полученных результатов видно, что спроектированная система «Гонец», включающая 24 космических аппарата и три ЗУСС, расположенных равномерно по территории Российской Федерации, будет обладать следующими характеристиками:

- рассмотренная орбитальная группировка системы связи в диапазоне широт от 60 град. с.ш. до 60 град. ю.ш. формирует покрытие поверхности Земли зонами радиовидимости КА для угла места 10 град., которое имеет разрывы, появляющиеся в отдельные моменты времени;
- для рассмотренной конфигурации расположения трех земных узловых стационарных станций на территории Российской Федерации коэффициент доступности КА орбитальной

группировки составляет величину около 97%. Использование дополнительной ЗУСС, расположенной на широте 70 град. с.ш. (г. Тикси), способно заметно улучшить вероятностно-временные показатели системы связи;

- наиболее вероятная длительность сеансов связи для абонентов на поверхности Земли (без привязки к конкретному их расположению) составляет интервал времени 10 мин. Максимальное время отсутствия радиовидимости КА над абонентами зависит от широты и не превышает 8 мин в экваториальных областях. В средних широтах это время не превысит 1–5 мин. В северных широтах можно гарантировать постоянное наличие хотя бы одного КА;
- если в расчетах принимать во внимание только сеансы связи абонентов с КА, длящиеся не менее 5 мин., то с точностью 1–2% будут совпадать коэффициент оперативной готовности орбитальной группировки (рис. 9) и коэффициент пространственной радиодоступности (рис. 1), построенный на основе мгновенных зон радиовидимости КА.

Литература

1. Машниц Л.М. Зоны гарантированного и регламентированного

уровней сигнала системы спутниковой связи. — М.: Радиотехника, 1977 г. — № 12

2. Акимов А.А. Анализ зон радиовидимости систем спутниковой связи на ИСЗ, размещаемых на орбитах различных типов / А.А. Акимов, А.М. Аносов, Г.С. Гусаков и др. // Электросвязь. — 1992. — № 1

3. Акимов А.А. Применение метода обобщенных зон для анализа и проектирования систем спутниковой связи / А.А. Акимов, М.Я. Талмуд, И.А. Палкин // Материалы 2 международной конференции «Спутниковая связь». — 1996. — Т. 1. — С. 141–151

4. Amre El-Hoiydi, CSEM, Jaquet-Droz 1, 2007 Neuchatel, Switzerland, Robert J. Finean, BT Laboratories, MLB4-67 Marlesham Heath, Ipswich IP5 7RE, UK, «Location Management for the Satellite – Universal Mobile Telecommunication System», IEEE 5-th International Conference on Universal Personal Communications ICUPC. — 1996

5. Harald Keller, Horst Salzwedel, Gunar Schorcht, Volker Zerbe. «Comparision of the Probability of Visibility of the Most Important Currently Projected Mobile Satellite Systems». Faculty of Computer Science and Automation, Technical University of Ilmenau, Ilmenau. P.O.Box 0565,98684 Ilmenau / Germany. — 1997. — 4–7 May

6. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика. — М.: РУДН, 2004

7. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных / Под ред. А.И. Галькевича. — Тамбов: ООО «Издательство Юлис», 2011. — 169 с.

8. Жаров А. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М»: состояние и перспективы // Технологии и средства связи, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание». — 2014. — № 6 (2) — С. 72–78

9. ГОСТ 27.002–2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Термины и определения

