

УДК 621.391

Моделирование и сравнительный анализ своевременности передачи информации от источника к получателю в двухуровневой системе спутниковой связи с использованием космических аппаратов на низких и геостационарной орбитах

Пантенков Д. Г.

Актуальность. В настоящее время широкое применение находят спутниковые системы передачи информации, которые позволяют организовывать радиоинформационный обмен данными на значительных удалениях друг от друга источника сообщения и его получателя, а также непрерывно обслуживать труднодоступные или удаленные от объектов основной инфраструктуры населенные пункты, в такой постановке задачи спутниковые системы связи (ССС) практически не имеют альтернативы. СССР и ретрансляции информации различаются между собой по различным техническим параметрам, но, в первую очередь, это орбита, на которой они функционируют. Низкоорбитальные (НО) космические аппараты (КА) таких известных систем спутниковой связи, как «Iridium», «Globalstar», «Orbcomm» и «Гонец», с одной стороны, имеют, по сравнению с КА на геостационарной орбите (ГСО), ряд преимуществ: отсутствуют большие временные задержки на распространение радиосигнала, значительно меньшие значения затуханий на трассе распространения радиосигнала, а также возможность работы с абонентами в Северных широтах и приполярных областях. С другой стороны, например, для орбитальной группировки (ОГ) КА «Гонец», у которой отсутствуют межспутниковые линии передачи информации между КА «Гонец» внутри ОГ, возможны существенные периоды ожидания в передаче информации с момента ее получения КА и до момента сброса получателю сообщения. **Целью работы** является имитационное моделирование в пакете прикладных программ «Satellite Tool Kit» оценки своевременности передачи информации от ОГ КА на низких орбитах конечному абоненту для случая без использования ретранслятора КА на ГСО и для случая совместного функционирования КА на НО и ГСО. В качестве примера КА на ГСО используется КА «Луч», в качестве КА на НО – КА «Гонец». **Результаты.** В статье представлены полученные по результатам моделирования числовые значения своевременности передачи информации – среднее время доведения информации от произвольно расположенных источников сообщения к его получателю на территории РФ. Экономический эффект от использования ретрансляции информации от НО аппаратов через КА на ГСО заключается в уменьшении требуемого количества КА на низкой орбите. **Элементом новизны работы** является подход к определению минимально необходимого состава ОГ КА для передачи информации от источника к получателю на основе методов программно-имитационного моделирования. **Практическая значимость** данного подхода заключается в принципиальной технической возможности анализа вариантов построения ОГ КА на различных орбитах и оценке их рациональности по различным частным критериям ещё на этапе проведения научно-исследовательской работы или аванпроекта в рамках подготовки к ОКР, что позволит заложить при формировании тактико-технического задания корректное требуемое число КА из состава космической системы, решив поставленную техническую задачу и сэкономив при этом финансовые ресурсы.

Ключевые слова: космический аппарат, низкоорбитальные космические системы, геостационарная орбита, иерархическая система, ретрансляция информации, среднее время доведения информации, имитационное моделирование, межспутниковые линии связи, «Гонец», «Луч».

Библиографическая ссылка на статью:

Пантенков Д. Г. Моделирование и сравнительный анализ своевременности передачи информации от источника к получателю в двухуровневой системе спутниковой связи с использованием космических аппаратов на низких и геостационарной орбитах // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 192-219. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10407.

Reference for citation:

Pantankov D. G. Simulation and Comparative Analysis of Transmission Timeliness Source-to-Recipient Information in a Two-Tier System Satellite Communications Using Spacecraft in Low and Geostationary Orbit. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 192-219 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10407.

Введение

Проведенный анализ научно-технического задела по тематике статьи показал, что в настоящий момент подобные вопросы рассматривались в работах [1-7], при этом в этих работах представлены:

- 1) концепция построения систем спутниковой связи (ССС) с использованием рационального сочетания орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) на высоких и низких орбитах, в том числе с использованием межспутниковых радиолиний связи (ретрансляции информации);
- 2) модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной СССР;
- 3) рассчитаны пропускные способности межспутниковых и фидерных радиолиний спутниковой связи в сложных ступенчатых системах;
- 4) оптимальное планирование и оперативное распределение радиоресурса СССР в целях организации устойчивого управления ОГ КА;
- 5) баллистическое построение, анализ информационной нагрузки, организация информационного обмена, модель СССР.

При этом открытым остается вопрос количественной оценки эффективности доведения информации в СССР при использовании сочетания ОГ КА на различных орбитах по выбранному критерию.

Целью статьи является получение усредненных количественных оценок своевременности по показателю времени доведения информации от источника сообщения к получателю с использованием прикладного программного обеспечения «Satellite Tool Kit» (STK), а представленный подход позволит в конечном итоге определять рациональное сочетание используемых ОГ низкоорбитальных и высокоорбитальных КА для решения различных целевых задач в части передачи оперативной информации.

В качестве низкоорбитальной группировки КА выбрана космическая система «Гонец», в качестве высокоорбитальной – многофункциональная космическая система ретрансляции (МКСР) «Луч».

Основным назначением спутниковой системы «Гонец» является обеспечение связью зон вне покрытия наземными сетями GSM, предоставление связной среды для российской системы координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС, связь со стационарными и мобильными абонентами в труднодоступных регионах [8, 9, 10].

Абонент системы «Гонец-Д1М» имеет возможность отправлять и получать текстовые сообщения неограниченного объема, используя абонентский терминал (АТ) «Гонец».

В качестве адресатов могут выступать адреса электронной почты, абоненты мобильных сетей связи или абоненты спутниковой сети «Гонец».

Оборудование и программное обеспечение КА и АТ спроектировано таким образом, что для работы системы не требуется непрерывное нахождение АТ в зоне радиовидимости КА. При отсутствии совместной зоны радиовидимости АТ и КА сообщение буферизуется на КА и передается при пролёте одного из КА системы над абонентом.

В данное время на базе КА «Гонец» реализованы следующие услуги:

- 1) обмен сообщениями между абонентами системы «Гонец» в глобальном масштабе;
- 2) передача данных о местоположении объектов, полученных с использованием системы ГЛОНАСС или других навигационных систем;
- 3) обмен сообщениями между абонентами системы «Гонец» и абонентами стандартной электронной почты как в персональном, так и в групповом режимах, по стандартным почтовым протоколам X.400 и SMTP/IMAP, с возможностью отправки прикрепленных файлов небольших размеров;
- 4) обмен сообщениями между абонентами системы «Гонец» и абонентами мобильных сетей связи в глобальном масштабе. АТ «Гонец» автоматически выбирает спутниковую или наземную мобильную сеть в зависимости от доступности на текущий момент;
- 5) циркулярная передача сообщений группе пользователей;
- 6) передача телеметрической информации контролируемых объектов в центры мониторинга;
- 7) построение ведомственных подсистем связи.

Низкая орбита в отличие от геостационарной требует менее мощного передатчика, что позволяет выпускать компактные и недорогие терминалы даже по сравнению с терминалами VSAT (very small aperture terminal).

Применение ОГ КА «Гонец» типично для систем подвижной спутниковой связи [8]:

- 1) передача координатно-временной информации ГЛОНАСС;
- 2) связь в удалённых регионах;
- 3) мониторинг транспорта;
- 4) мониторинг экологических и промышленных объектов;
- 5) связь в зоне бедствий;
- 6) связь в интересах различных ведомств и Министерств.

Типичными сферами применения системы «Гонец-Д1М» являются сбор и передача координатно-временной информации ГЛОНАСС от средств транспорта, сбор и передача датчиковой информации со стационарных или подвижных объектов в труднодоступных районах (например, мониторинг буровых вышек, метеорологических станций, трубопроводов и т.п.), персональная связь с абонентами в труднодоступных регионах, передача конфиденциальной информации между удалёнными абонентами. Услуги на базе системы оказываются в глобальном масштабе [8].

В соответствии с концепцией построения МКСР «Луч» для повышения эффективности использования энергетических и частотных ресурсов спутников-ретрансляторов на систему возложено решение следующих задач [9, 10]:

- информационный обмен с низкоорбитальными подвижными объектами, включающий съём информации целевого назначения, двустороннюю связь с пилотируемыми КА, контроль и управление функционированием;
- ретрансляция гидрометеорологической информации;

- ретрансляция сигналов с аварийных радиобуев космической системы спасения КОСПАС-САРСАТ;
- ретрансляция наземным и космическим абонентам (пользователям ГЛОНАСС) сигналов системы дифференциальной коррекции и мониторинга;
- двусторонняя телевизионная и телефонная связь с мобильной аппаратурой для телемостов и телерепортажей.

Главным элементом в цепи передачи информации от низкоорбитальных (НО) КА (подвижный объект) – КА на геостационарной орбите (ГСО) – пункт приема и передачи информации (ПППИ) является бортовой ретранслятор КА, который для КА серии «Луч-5» получил название бортовой ретрансляционный комплекс контроля и управления (БРК КУ).

Функциональная схема БРК КУ спутников-ретрансляторов «Луч-5А» и «Луч-5В» представлена на рис. 1.

БРК КУ КА «Луч-5Б» является уменьшенным вариантом БРК КУ КА «Луч-5А» и «Луч-5В» из-за отсутствия в нем стволов S-диапазона с множественным доступом [9, 10].

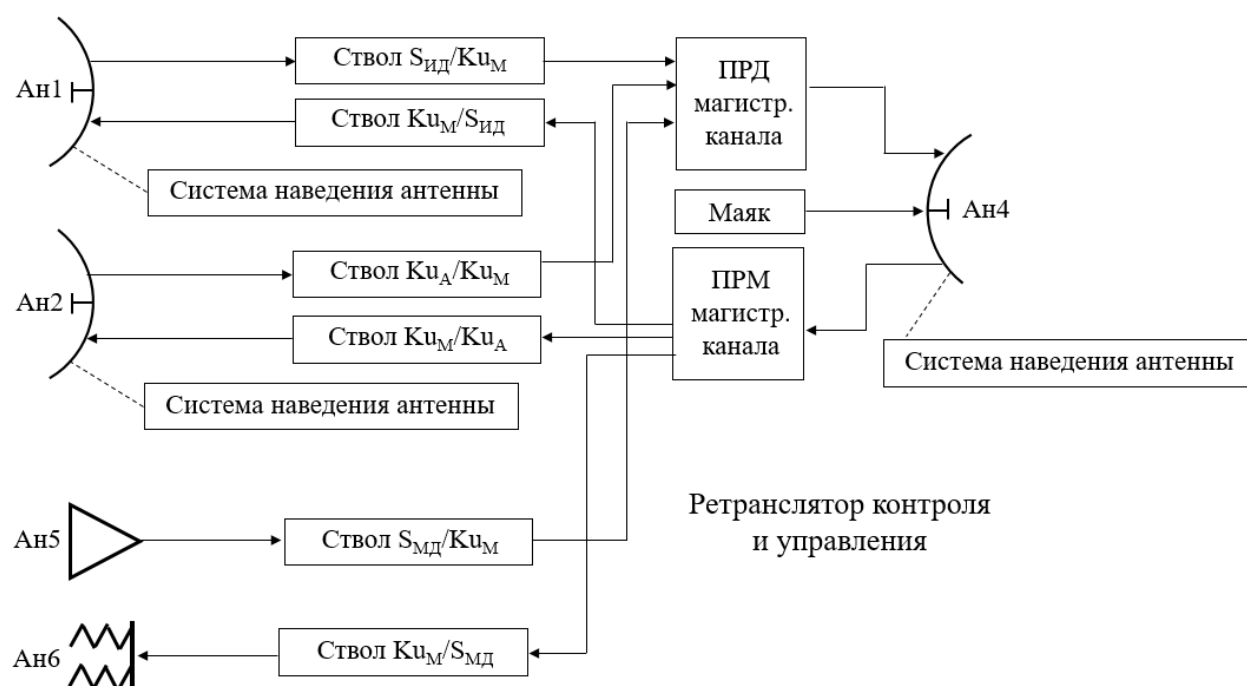


Рис. 1. Функциональная схема БРК КУ КА «Луч-5А» и «Луч-5В»

Как следует из схемы на рис. 1, БРК КУ СР «Луч-5А» и «Луч-5В» содержит:

- ствол $S_{ид}/Ku_M$ для приема информации от КА на НО по абонентскому каналу в S-диапазоне в режиме индивидуального доступа (ИД) и передачи ее на ПППИ по магистральному каналу в Ku-диапазоне частот;
- ствол $S_{ид}/Ku_M$ для приема информации от ПППИ по магистральному каналу в Ku-диапазоне и передачи ее на НО КА по абонентскому каналу в S-диапазоне частот в режиме ИД;

- ствол Ku_A/Ku_M для приема информации от НО КА по абонентскому каналу в Ku -диапазоне частот в режиме ИД и передачи ее на ПППИ по магистральному каналу в Ku -диапазоне частот;
- ствол Ku_M/Ku_A для приема информации от ПППИ по магистральному каналу в Ku -диапазоне частот и передачи ее на НО КА по абонентскому каналу в Ku -диапазоне частот в режиме ИД;
- ствол S_{MD}/Ku_M для приема информации от НО КА по абонентскому каналу в S -диапазоне частот в режиме множественного доступа (МД) и передачи ее на ПППИ по магистральному каналу в Ku -диапазоне частот;
- ствол Ku_M/S_{MD} для приема информации от ПППИ по магистральному каналу в Ku -диапазоне частот и передачи ее на НО КА по абонентскому каналу в S -диапазоне частот в режиме МД.

На рис. 1 индексы «А» и «М» в наименовании стволов относятся соответственно к абонентскому и магистральному направлениям, «ИД» и «МД» обозначают индивидуальный и множественный доступ в S - и Ku -диапазонах радиочастот; Ан1, Ан2, Ан3, Ан4, Ан5, Ан6 обозначают приемо-передающие антенны, ПРД означает передатчик, ПРМ – приемник [9, 10].

Постановка задачи

Целью исследования является определение количественного выигрыша от взаимодействия низкоорбитальной группировки КА типа «Гонец» с ОГ КА на ГСО типа «Луч», выраженного в уменьшении времени доведения полезной информации от источника сообщения к его получателю.

Задача решается статистически с использованием прикладного пакета программ имитационного моделирования «Satellite Tool Kit» в три этапа.

Имитационное моделирование по оценке своевременности доведения информации от источника к получателю при двухуровневой системе спутниковой связи

Этап 1

На первом этапе разработана имитационная модель функционирования низкоорбитальной группировки КА «Гонец» (без ретрансляции информации с использованием КА «Луч» на ГСО), которая позволяет набрать требуемый объем статистических данных для последующего расчета среднего времени доведения полезной информации от источника сообщения к его получателю.

В качестве исходных данных при разработке модели использованы данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные, используемые в модели

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Число КА в ОГ	12 (4 плоскости по 3 КА)
2	Зона обслуживания	глобальная
3	Тип орбиты	низкая
4	Высота орбиты, км	1500
5	Наклонение орбиты, °	82,5
6	Разнос плоскостей по долготе восходящего узла, °	45
7	Период обращения КА, мин	115
8	Координаты источников сообщения	США (49° с.ш., 102° з.д.) Южная Америка (16° ю.ш., 59° з.д.) Африка (10° с.ш., 19° в.д.) Австралия (24° ю.ш., 134° в.д.)
9	Координаты получателей сообщения	Территория РФ

На рис. 2 представлено условное движение КА «Гонец» по низкой орбите. Момент времени t_0 соответствует началу моделирования функционирования ОГ. В момент времени t_1 (через время Δt_1 относительно начала моделирования) КА «Гонец» получает полезную информацию от источника сообщения. В момент времени t_2 (через время $\Delta t_1 + \Delta t_2$ относительно начала моделирования) КА «Гонец» осуществляет сброс информации ее получателю на пункт, расположенный на территории РФ. Суммарное время $t_{\text{сумм}} = \Delta t_1 + \Delta t_2$ является временем доставки информации от источника сообщения к его получателю.

В силу того, что начальное построение ОГ КА «Гонец» (на момент начала моделирования) является псевдослучайным относительно зоны радиовидимости КА и координат источников сообщения и его потребителя, то целесообразно для каждого КА рассчитать несколько значений времени передачи информации от каждого источника сообщения до потребителя с задержкой КА по орбите на некоторый интервал времени (в модели посчитано для 5 значений времени задержки – 0, 20, 40, 60, 80 мин). В таком случае значение среднего времени доставки сообщения будет иметь принимать более корректное значение.

Усреднение по времени осуществляется относительно источника сообщения (таблица 2, 3, 4, 5 для четырех источников сообщения).

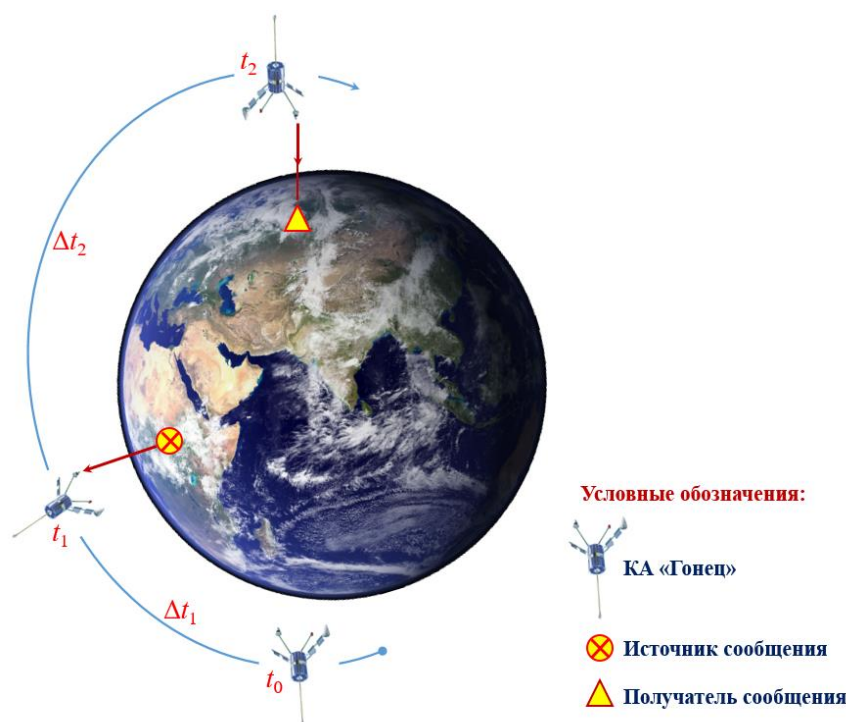


Рис. 2. Условное движение КА «Гонец» по низкой орбите

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° для «абонента США»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	32,5 мин	12,2 мин	7 ч 26 мин	7 ч 6 мин	6 ч 46 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	1 ч 24 мин	1 ч 33 мин	1 ч 13 мин	53 мин	33 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	1 ч 12 мин	52 мин	32,5 мин	12 мин	7 час 29 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	22 мин	2 мин	1 ч 40 мин	1 ч 20 мин	1 ч
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	1 ч 39 мин	1 ч 19 мин	59 мин	39 мин	19 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	1 ч 4 мин	44 мин	24 мин	4 мин	1 ч 38 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	9 мин	1 ч 47 мин	1 ч 27 мин	1 ч 7 мин	47 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	1 ч 27 мин	1 ч 7 мин	47 мин	27 мин	7 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	48,5 мин	28,5 мин	8,5 мин	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	2 мин	1 ч 32 мин	1 ч 12 мин	52 мин	32 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	1 ч 11 мин	51 мин	31 мин	11 мин	1 ч 54 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	29 мин	9 мин	1 ч 56 мин	1 ч 36 мин	1 ч 16 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		4,7 мин				

Таблица 3 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклоном 82,5° для «абонента Южная Америка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	9 ч 8 мин	8 ч 48 мин	8 ч 28 мин	8 ч 8 мин	7 ч 48 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	7 ч 28 мин	7 ч 8 мин	6 ч 48 мин	6 ч 28 мин	6 ч 8 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	6 ч 48 мин	6 ч 28 мин	6 ч 8 мин	5 ч 48 мин	5 ч 28 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин	1 ч 15 мин	55 мин	35 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	1 ч 17 мин	57 мин	37 мин	17 мин	7 ч 53 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	2 ч 35 мин	2 ч 15 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин	1 ч 15 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	1 ч 47 мин	1 ч 27 мин	1 ч 7 мин	47 мин	27 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	1 ч 8 мин	48 мин	28 мин	8 мин	1 ч 44 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	2 ч 26 мин	2 ч 6 мин	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	5 ч 30 мин	5 ч 10 мин	4 ч 50 мин	4 ч 30 мин	4 ч 10 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	4 ч 52 мин	4 ч 32 мин	4 ч 12 мин	3 ч 52 мин	3 ч 32 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	4 ч 14 мин	3 ч 54 мин	3 ч 34 мин	3 ч 14 мин	2 ч 54 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Южная Америка»		35,8 мин				

Таблица 4 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклоном 82,5° для «абонента Африка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	2 ч 3 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин	1 ч 3 мин	43 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	1 ч 24 мин	1 ч 4 мин	44 мин	24 мин	4 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	47 мин	27 мин	7 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	3 ч 50 мин	3 ч 30 мин	3 ч 10 мин	2 ч 50 мин	2 ч 30 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	5 ч 8 мин	4 ч 48 мин	4 ч 28 мин	4 ч 8 мин	3 ч 48 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	4 ч 30 мин	4 ч 10 мин	3 ч 50 мин	3 ч 30 мин	3 ч 10 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	7 ч 34 мин	7 ч 14 мин	6 ч 54 мин	6 ч 34 мин	6 ч 14 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	6 ч 55 мин	6 ч 35 мин	6 ч 15 мин	5 ч 55 мин	5 ч 35 мин

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	8 ч 11 мин	7 ч 51 мин	7 ч 31 мин	7 ч 11 мин	6 ч 51 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин	1 ч 3 мин	43 мин	23 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	3 ч	2 ч 40 мин	2 ч 20 мин	2 ч	1 ч 40 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	2 ч 28 мин	2 ч 8 мин	1 ч 48 мин	1 ч 28 мин	1 ч 8 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Африка»		21,8 мин				

Таблица 5 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° для «абонента Австралия»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	6 ч 10 мин	5 ч 50 мин	5 ч 30 мин	5 ч 10 мин	4 ч 50 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	7 ч 30 мин	7 ч 10 мин	6 ч 50 мин	6 ч 30 мин	6 ч 10 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	6 ч 48 мин	6 ч 28 мин	6 ч 8 мин	5 ч 48 мин	5 ч 28 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	9 ч 52 мин	9 ч 32 мин	9 ч 12 мин	8 ч 52 мин	8 ч 32 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	9 ч 15 мин	8 ч 55 мин	8 ч 35 мин	8 ч 15 мин	7 ч 55 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	41 мин	21 мин	1 мин	10 ч 33 мин	10 ч 13 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	1 ч 48 мин	1 ч 28 мин	1 ч 8 мин	48 мин	28 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	1 ч 10 мин	50 мин	30 мин	10 мин	1 ч. 45 мин.
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	30 мин	10 мин	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	3 ч 34 мин	3 ч 14 мин	2 ч 54 мин	2 ч 34 мин	2 ч 14 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	2 ч 56 мин	2 ч 36 мин	2 ч 16 мин	1 ч 56 мин	1 ч 36 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	2 ч 22 мин	2 ч 2 мин	1 ч 42 мин	1 ч 22 мин	1 ч 2 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Австралия»		15,8 мин				

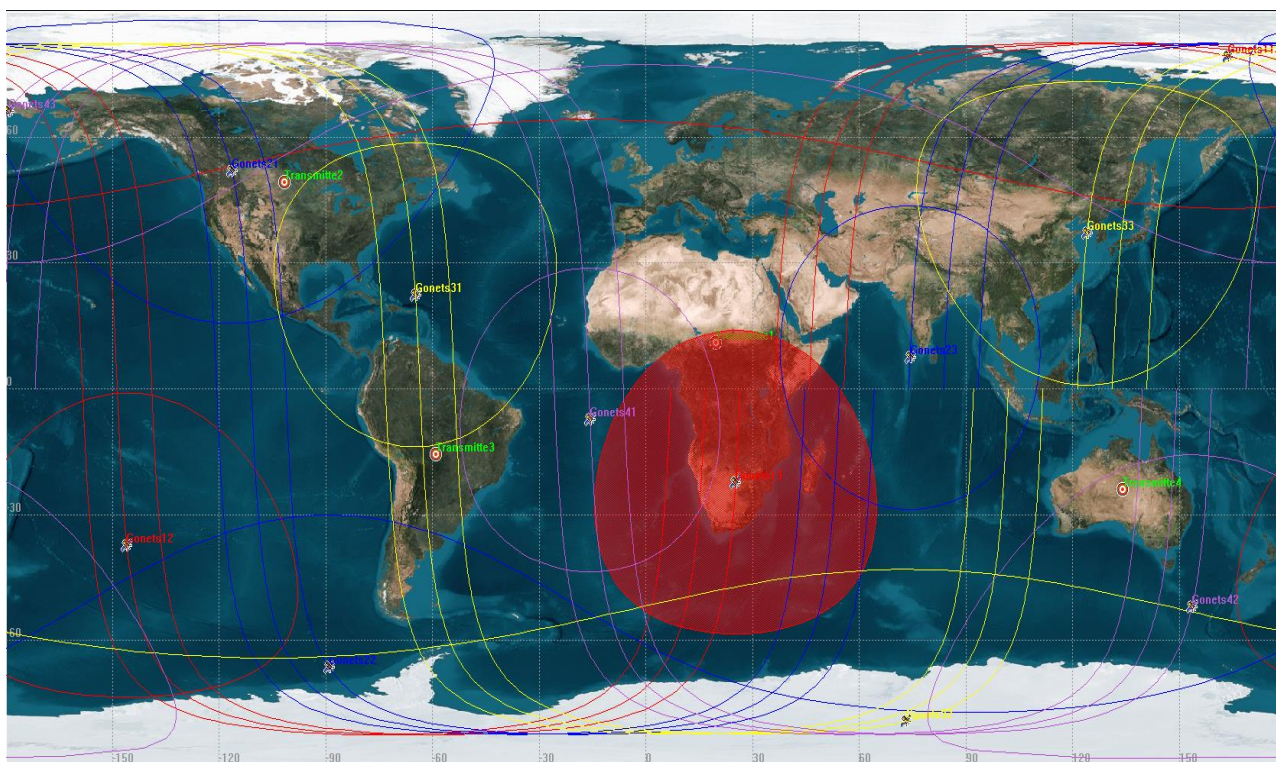


Рис. 3. Момент получения информации КА «Гонец» (третий КА в первой орбитальной плоскости) от источника сообщения, расположенного на территории Африки

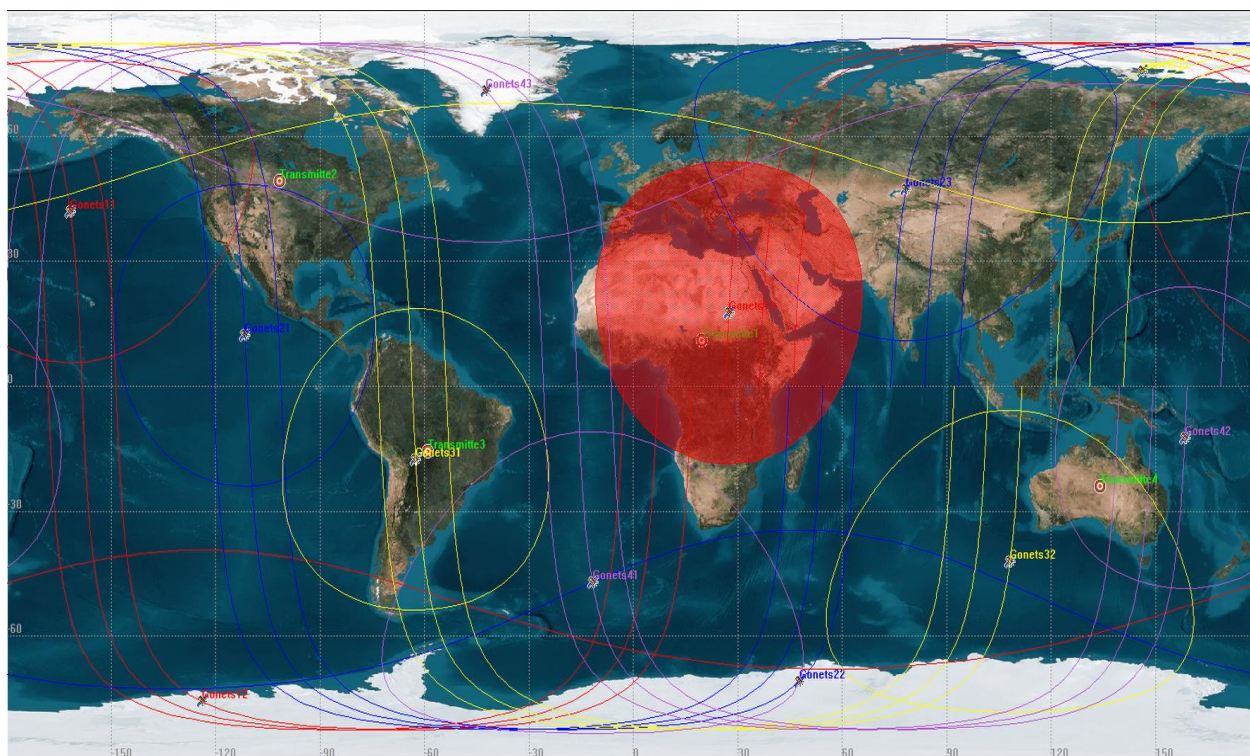


Рис. 4. Движение КА «Гонец» по орбите в направлении получателя информации

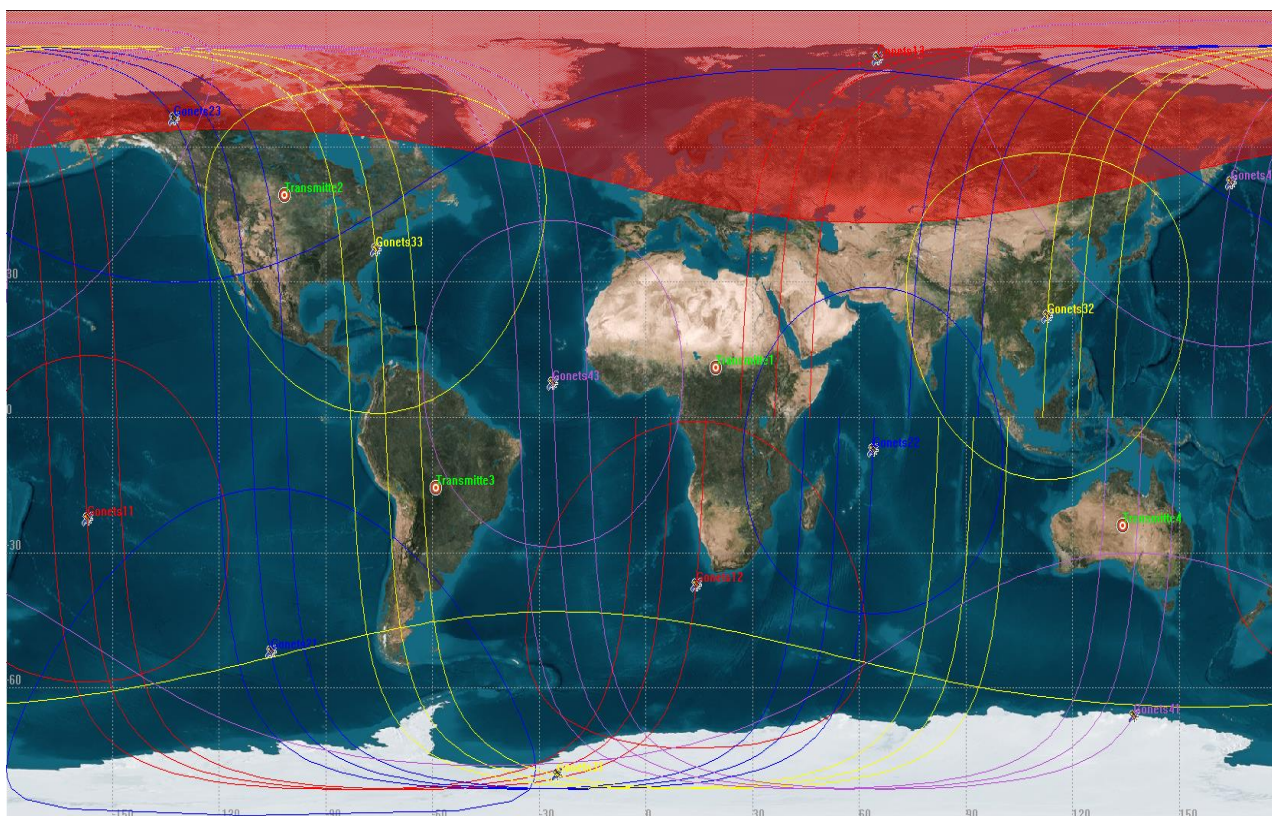


Рис. 5. Момент сброса информации КА «Гонец» ее получателю, расположенному на территории РФ

Этап 2

На втором этапе разработана имитационная модель функционирования КА на НО «Гонец» при взаимодействии с ОГ КА «Луч» на ГСО, которая позволяет набрать требуемый объем статистических данных для последующего расчета среднего времени доведения полезной информации от источника сообщения к его получателю с использованием межспутникового канала связи «Гонец-Луч-получатель информации».

В качестве исходных данных при разработке модели использованы данные, представленные в таблице 6.

На рис. 6 представлено условное движение одного КА «Гонец» по низкой орбите (в вертикальной плоскости) и трех КА «Луч» на ГСО (в горизонтальной плоскости). Момент времени t_0 соответствует началу моделирования функционирования ОГ. В момент времени t_1 (через время Δt_1 относительно начала моделирования) КА «Гонец» получает полезную информацию от источника сообщения, а затем осуществляет ее передачу к получателю путем ретрансляции через КА «Луч» на ГСО в случае, если КА «Гонец» находится в зоне радиовидимости одного из трех КА «Луч» (время ретрансляции сообщения по каналу «КА Гонец-КА Луч-получатель информации» Δt_2 составляет порядка 240 мс). В противном случае, к расчетному времени передачи информации от источника сообщения к его получателю необходимо добавить время с момента получения информации КА «Гонец» до момента вхождения КА «Гонец» в зону радиовидимости КА «Луч».

Суммарное время $t_{\text{сумм}} = \Delta t_1 + \Delta t'_2$ является временем доставки информации от источника сообщения к его получателю.

Таблица 6 – Исходные данные, используемые в модели

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
КА «Гонец»		
1	Число КА в ОГ	12 (4 плоскости по 3 КА)
2	Зона обслуживания	глобальная
3	Тип орбиты	низкая
4	Высота орбиты, км	1500
5	Наклонение орбиты, °	82,5
6	Разнос плоскостей по долготе восходящего узла, °	45
7	Период обращения КА, мин.	115
8	Координаты источников сообщения	США (49° с.ш., 102° з.д.) Южная Америка (16° ю.ш., 59° з.д.) Африка (10° с.ш., 19° в.д.) Австралия (24° ю.ш., 134° в.д.)
9	Координаты получателей сообщения	Территория РФ
КА «Луч»		
10	Число КА в ОГ	3
11	Зона обслуживания	глобальная
12	Тип орбиты (точки стояния)	геостационарная (16° з.д., 95° в.д., 167° в.д.)
13	Высота орбиты, км	35800

В силу того, что начальное построение ОГ КА «Гонец» (на момент начала моделирования) является псевдослучайным относительно зоны радиовидимости КА и координат источников сообщения и его потребителя, то целесообразно для каждого КА рассчитать несколько значений времени передачи информации от каждого источника сообщения до потребителя с задержкой КА по орбите на некоторый интервал времени (в модели посчитано для 5 значений времени задержки – 0, 20, 40, 60, 80 мин). В таком случае значение среднего времени доставки сообщения будет иметь принимать более корректное значение.

Усреднение по времени осуществляется относительно источника сообщения (таблица 7, 8, 9, 10 для четырех источников сообщения).

На рис. 7 представлены зоны радиовидимости трех КА «Луч», расположенных на ГСО в трехмерной и двухмерной плоскостях.

На рис. 8, 9 соответственно представлены перехваты с экрана работы модели для случая передачи информации от источника сообщения, расположенного в США, для случая нахождения КА «Гонец» в зоне радиовидимости КА «Луч» и для случая нахождения КА «Гонец» в «мертвой зоне» относительно зоны обслуживания КА «Луч».

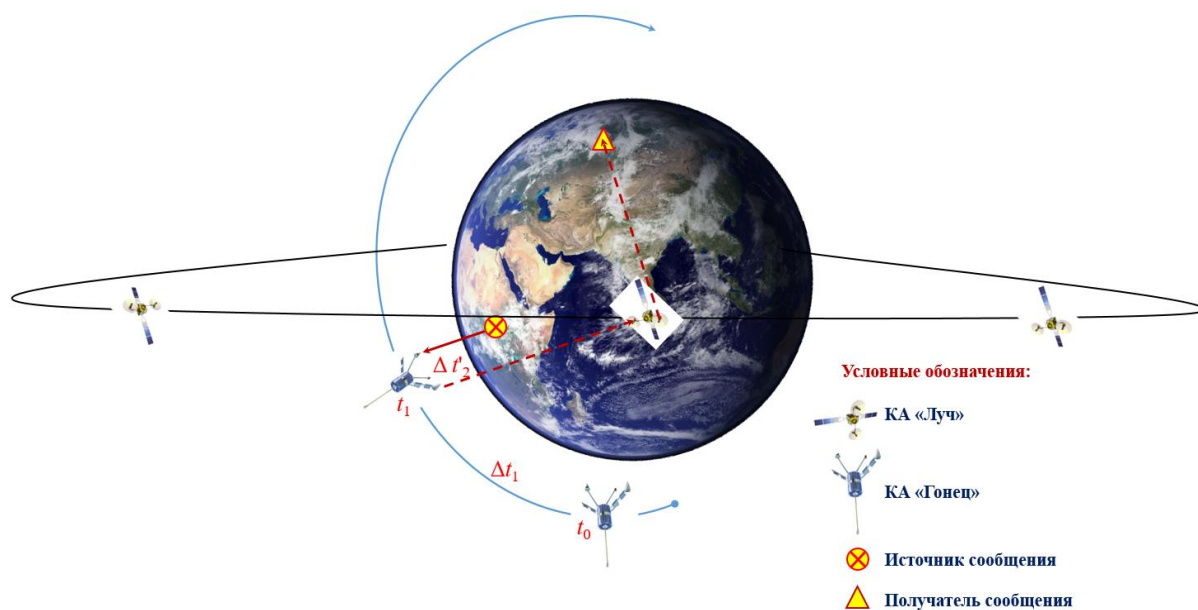


Рис. 6. Условное движение КА «Гонец» по низкой орбите

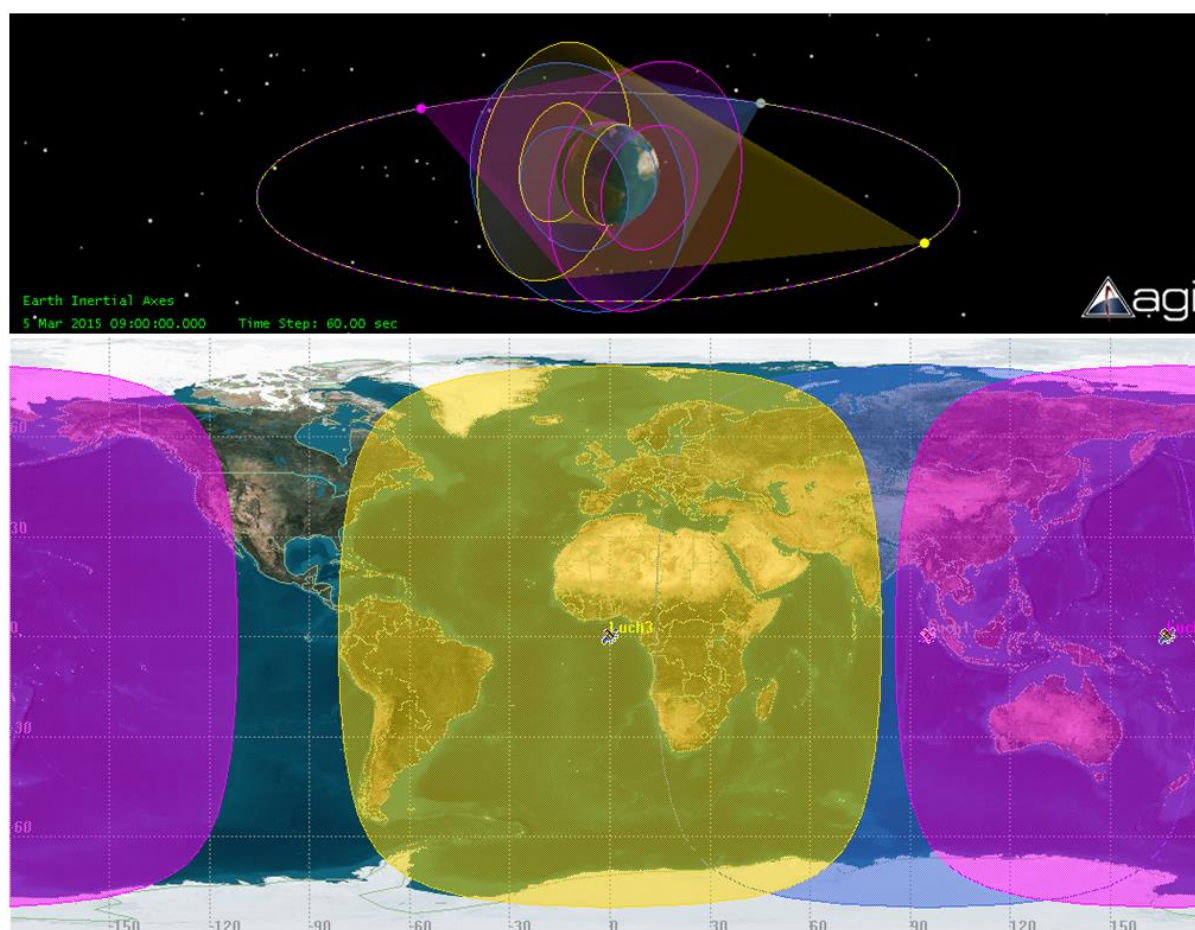


Рис. 7. Зоны радиовидимости трех КА «Луч», расположенных на геостационарной орбите в трехмерной и двухмерной плоскостях

Таблица 7 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклоном 82,5° и ОГ «Луч» в составе 3 КА на ГСО (16° з.д., 95° в.д., 167° в.д.) для «абонента США»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	32 мин	13 мин	240 мс	1 ч 34 мин	1 ч 14 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	240 мс	1 ч 32 мин	1 ч 12 мин	52 мин	32 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	1 ч 12 мин	52,5 мин	32,5 мин	12,5 мин	240 мс
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	1 ч 21 мин	1 ч 1,5 мин	41,5 мин	21,5 мин	1,5 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	240 мс	240 мс	1 ч 57 мин	1 ч 37 мин	1 ч 17,5 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	2 ч	1 ч 40 мин	1 ч 20 мин	1 ч	40 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	2 ч 17 мин	1 ч 57,5 мин	1 ч 37 мин	1 ч 17 мин	57,5 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	2 ч 36 мин	2 ч 16,5 мин	1 ч 56 мин	1 ч 36 мин	1 ч 16,5 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	3 ч 45 мин	3 ч 25 мин	3 ч 5 мин	2 ч 45 мин	2 ч 25 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	3 мин	1 ч 32,5 мин	1 ч 12 мин	52,5 мин	32,5 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	1 ч 8 мин	48,5 мин	28,5 мин	8,5 мин	2 ч
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	1 ч 21 мин	1 ч 1,5 мин	41,5 мин	21,5 мин	1,5 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		1,7 мин				

Таблица 8 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклоном 82,5° и ОГ «Луч» в составе 3 КА на ГСО (16° з.д., 95° в.д., 167° в.д.) для «абонента Южная Америка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	5 ч 39 мин	5 ч 19 мин	4 ч 59 мин	4 ч 39 мин	4 ч 19 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	6 ч 51 мин	6 ч 31,5 мин	6 ч 11 мин	5 ч 51 мин	5 ч 31,5 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	6 ч 14 мин	5 ч 54,5 мин	5 ч 34 мин	5 ч 14 мин	4 ч 54,5 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	1 ч 22 мин	1 ч 2 мин	42 мин	22 мин	2 мин.
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	5 ч 30 мин	5 ч 10 мин	4 ч 50 мин	4 ч 30 мин	4 ч 10 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	2 ч	1 ч 40 мин	1 ч 20 мин	1 ч	40 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	36 мин	16 мин	240 мс	1 ч 30 мин	1 ч 10 мин

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	6 ч 17 мин	5 ч 57 мин	5 ч 37 мин	5 ч 17 мин	4 ч 57 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	3 ч 8 мин	2 ч 48 мин	2 ч 28 мин	2 ч 8 мин	1 ч 48 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	4 ч 17 мин	3 ч 57 мин	3 ч 37 мин	3 ч 17 мин	2 ч 57 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	3 ч 40 мин	3 ч 20 мин	3 ч	2 ч 40 мин	2 ч 20 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	4 ч 55 мин	4 ч 35 мин	4 ч 15 мин	3 ч 55 мин	3 ч 35 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Южная Америка»		15,2 мин				

Таблица 9 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° и ОГ «Луч» в составе 3 КА на ГСО (16° з.д., 95° в.д., 167° в.д.) для «абонента Африка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	1 ч 49 мин	1 ч 29 мин	1 ч 9 мин	49 мин	29 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	3 ч 7 мин	2 ч 47 мин	2 ч 27 мин	2 ч 7 мин	1 ч 47 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	36,5 мин	16,5 мин	240 мс	1 ч 27 мин	1 ч 7,5 мин
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	3 ч 40 мин	3 ч 20 мин	3 ч	2 ч 40 мин	2 ч 20 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	4 ч 53 мин	4 ч 33 мин	4 ч 13 мин	3 ч 53 мин	4 ч 33 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	4 ч 15 мин	3 ч 55 мин	3 ч 35 мин	3 ч 15 мин	2 ч 55 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	7 ч 20 мин	7 ч	6 ч 40 мин	6 ч 20 мин	6 ч
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	21,5 мин	1,5 мин	1 ч 32 мин	1 ч 12 мин	52 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	8 ч. 11 мин.	7 ч 51 мин	7 ч 31 мин	7 ч 11 мин	6 ч 51 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	17 мин	240 мс	10 ч 20 мин	10 ч	9 ч 40 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	1 ч 41,5 мин	1 ч 21 мин	1 ч 1,5 мин	41,5 мин	21,5 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	7 ч 51 мин	7 ч 31 мин	7 ч 11 мин	6 ч 51 мин	6 ч 31 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Африка»		16 мин				

Таблица 10 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 12 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° и ОГ «Луч» в составе 3 КА на ГСО (16° з.д., 95° в.д., 167° в.д.) для «абонента Австралия»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	5 ч	4 ч 40 мин	4 ч 20 мин	4 ч	3 ч 40 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 120°)	6 ч 6 мин	5 ч 46 мин	5 ч 26 мин	5 ч 6,мин	4 ч 46,5 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 240°)	5 ч 20 мин	5 ч	4 ч 40 мин	4 ч 20 мин	4 ч
4	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	8 ч 34 мин	8 ч 14 мин	7 ч 54 мин	7 ч 34 мин	7 ч 14,5 мин
5	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 150°)	8 ч	7 ч 40 мин	7 ч 20 мин	7 ч	6 ч 40 мин
6	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 270°)	24 мин	4 мин	8 ч 31 мин	8 ч 11 мин	7 ч 51 мин
7	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	1 ч 19 мин	59 мин	39 мин	19 мин	240 мс
8	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 180°)	1 ч 10 мин	50 мин	30 мин	10 мин	1 ч 14 мин
9	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 300°)	2 ч 23 мин	2 ч 3 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин	1 ч 3 мин
10	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	1 ч 17,5 мин	57,5 мин	37,5 мин	17,5 мин	1 ч 59 мин
11	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 210°)	2 ч 27 мин	2 ч 7,5 мин	1 ч 47 мин	1 ч 27 мин	1 ч 7,5 мин
12	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 330°)	1 ч 50 мин	1 ч 30 мин	1 ч 10 мин	50 мин	30 мин
Среднее время доставки информации для «абонента Австралия»		13,6 мин				

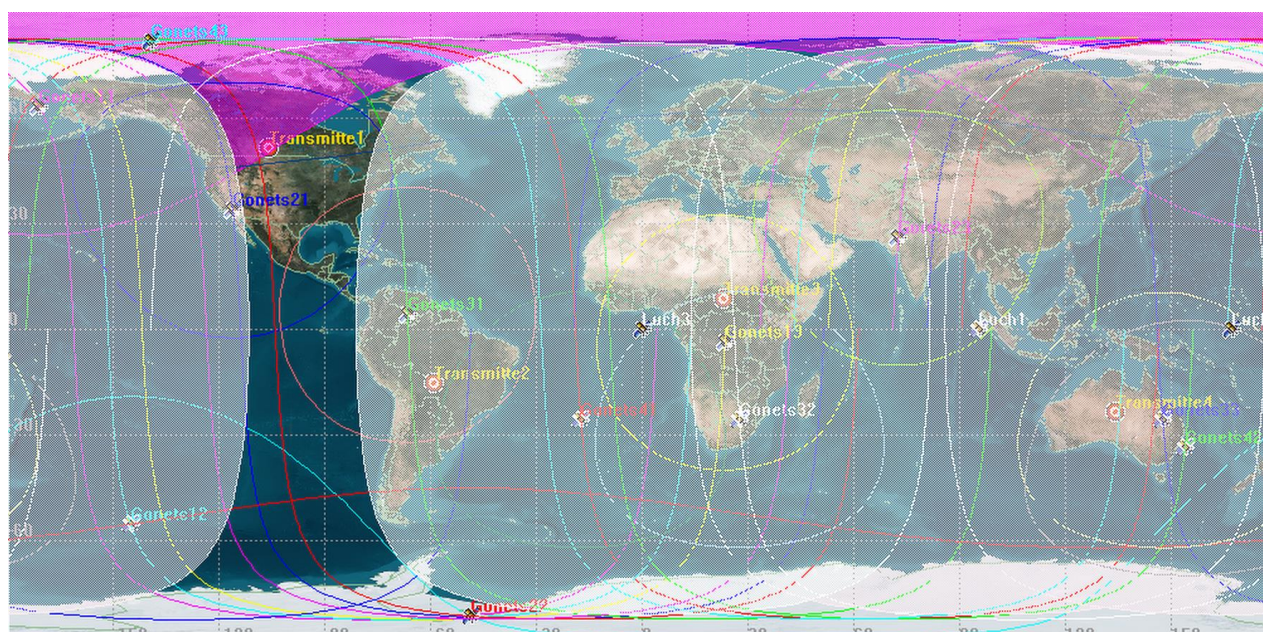


Рис. 8. Перехват с экрана работы модели для случая передачи информации от источника сообщения («Transmitter1»), расположенного в США, для случая нахождения КА «Гонец» (Gonets11) в зоне радиовидимости КА «Луч»

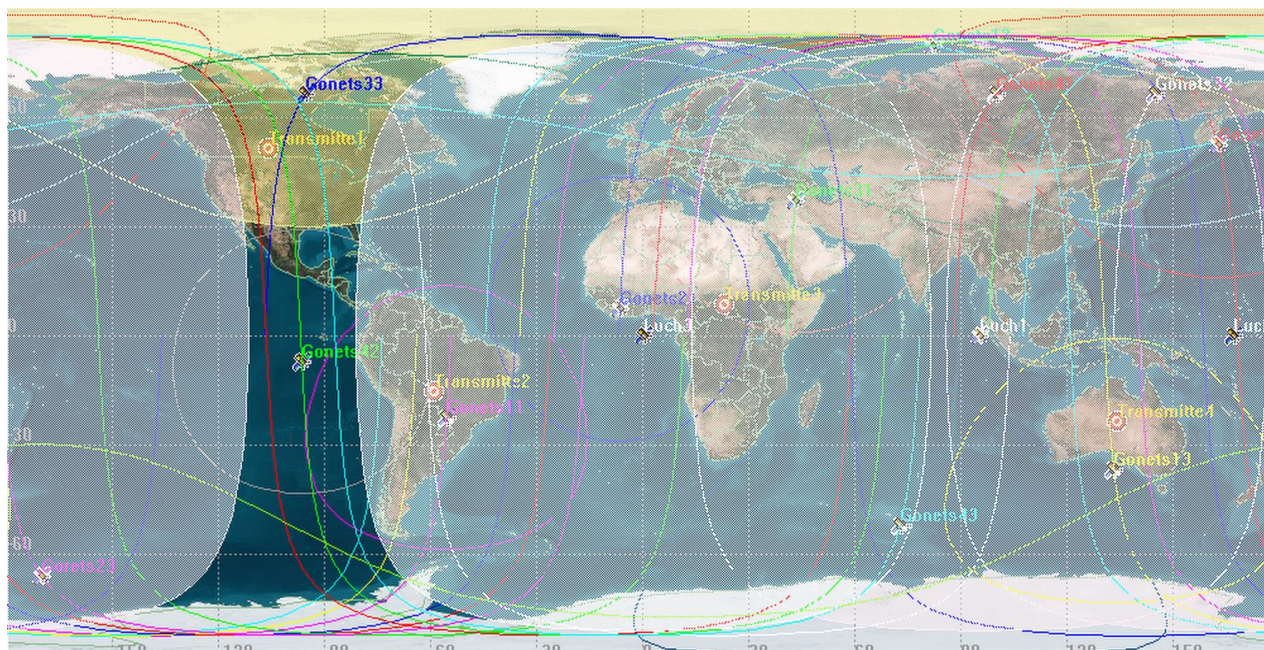


Рис 9. Перехват с экрана работы модели для случая передачи информации от источника сообщения («Transmitte1»), расположенного в США, для случая нахождения КА «Гонец» (Gonets33) в «мертвой зоне» относительно зоны радиовидимости КА «Луч»

В таблице 11 представлены результаты моделирования в части определения среднего времени доведения информации от ОГ КА «Гонец» до получателя сообщения с использованием и без использования трех КА «Луч» на ГСО.

Таблица 11 – Результаты моделирования в части определения среднего времени передачи информации от ОГ КА «Гонец» до получателя сообщения с использованием/без использования трех КА «Луч» на ГСО

Среднее время передачи информации t , мин.	Местонахождение источника сообщения			
	США	Южная Америка	Африка	Австралия
ОГ КА «Гонец»	4,7	35,8	21,8	15,8
ОГ КА «Гонец» совместно с ОГ КА «Луч»	1,7	15,2	16	13,6
Средний выигрыш в своевременности Δt от использования спутниковых ретрансляторов на ГСО, мин	3,0	20,6	5,8	2,2

Этап 3

На третьем этапе моделирования подсчитаем экономический эффект использования межспутниковых линий ретрансляции полезного сообщения через КА «Луч» на ГСО следующим образом. Будем последовательно добавлять в существующую ОГ КА «Гонец», состоящую в настоящий момент из 12 КА на низкой орбите (как на первом этапе моделирования), по одному новому КА, после чего по результатам моделирования подсчитаем изменение среднего времени доведения информации от источника сообщения к его потребителю. Оче-

видно, что по мере нарастания ОГ время доведения информации будет уменьшаться.

Увеличение числа КА «Гонец» в составе ОГ будет продолжаться до тех пор, пока среднее время передачи информации в новой увеличенной по составу ОГ КА «Гонец» будет не более, чем среднее время передачи информации при взаимодействии ОГ КА «Гонец» (в составе 12 КА) с ОГ из трех КА «Луч» на ГСО. Экономический эффект в данном случае – разница в количестве КА «Гонец» в составе исходной (этап 1) и наращенной (этап 3) ОГ при условии достижения минимального значения среднего времени передачи информации. Результаты моделирования представлены в таблицах 12, 13, 14, 15.

Таблица 12 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 16 КА на низкой орбите (1500 км) с наклоном 82,5° для «абонента США»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	32 мин	12 мин	1 ч 53 мин	1 ч 33 мин	1 ч 13 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 90°)	2 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин	1 ч 3 мин	43 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 180°)	1 ч 32 мин	1 ч 12 мин	52 мин	32 мин	12 мин
4	Доп. Гонец 14 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 270°)	1 ч 3,5 мин	43,5 мин	23,5 мин	3,5 мин	7 ч 19,5 мин
5	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	20,5 мин	0,5 мин	1 ч 37 мин	1 ч 17 мин	57 мин
6	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 120°)	1 ч 48 мин	1 ч 28 мин	1 ч 8 мин	48 мин	28 мин
7	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 210°)	1 ч 9 мин	49 мин	29 мин	9 мин	47 мин
8	Доп. Гонец 24 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 300°)	41 мин	21 мин	1 мин	1 ч 37 мин	1 ч 17 мин
9	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	7,5 мин	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин	46 мин
10	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 150°)	1 ч 36 мин	1 ч 16 мин	56 мин	36 мин	16 мин
11	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 240°)	4 ч 56 мин	4 ч 36 мин	4 ч 16 мин	3 ч 56 мин	3 ч 36 мин
12	Доп. Гонец 34 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 330°)	4 ч 26 мин	4 ч 6 мин	3 ч 46 мин	3 ч 26 мин	3 ч 6 мин
13	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	0,5 мин	1 ч 30 мин	1 ч 10 мин	50 мин	30 мин
14	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 180°)	1 ч 21 мин	1 ч 1 мин	41 мин	21 мин	1 мин
15	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 270°)	43,5 мин	23,5 мин	3,5 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин
16	Доп. Гонец 44 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 360°)	42 мин	22 мин	2 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		1,3 мин				

Таблица 13 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 16 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° для «абонента Южная Америка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	6 ч 10 мин	5 ч 50 мин	5 ч 30 мин	5 ч 10 мин	4 ч 50 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 90°)	7 ч 39,5 мин	7 ч 19 мин	6 ч 59 мин	6 ч 39,5 мин	6 ч 19,5 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 180°)	7 ч 12 мин	6 ч 52 мин	6 ч 32 мин	6 ч 12 мин	5 ч 52 мин
4	Доп. Гонец 14 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 270°)	6 ч 41 мин	6 ч 21 мин	6 ч 1 мин	5 ч 41 мин	5 ч 21 мин
5	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	1 ч 56 мин	1 ч 36 мин	1 ч 16 мин	56 мин	36 мин
6	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 120°)	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин	46 мин	26 мин	6 мин
7	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 210°)	2 ч 43 мин	2 ч 23 мин	2 ч 3 мин	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин
8	Доп. Гонец 24 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 300°)	2 ч 14 мин	1 ч 54 мин	1 ч 34 мин	1 ч 14 мин	54 мин
9	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	1 ч 47 мин	1 ч 27 мин	1 ч 7 мин	47 мин	27 мин
10	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 150°)	7 ч 7 мин	6 ч 47 мин	6 ч 27 мин	6 ч 7 мин	5 ч 47 мин
11	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 240°)	1 ч 4 мин	44 мин	24 мин	4 мин	6 ч 49 мин
12	Доп. Гонец 34 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 330°)	2 ч 24 мин	2 ч 4 мин	1 ч 44 мин	1 ч 24 мин	1 ч 4 мин
13	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	2 ч 55 мин	2 ч 35 мин	2 ч 15 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин
14	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 180°)	5 ч 30 мин	5 ч 10 мин	4 ч 50 мин	4 ч 30 мин	4 ч 10 мин
15	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 270°)	5 ч	4 ч 40 мин	4 ч 20 мин	4 ч	3 ч 40 мин
16	Доп. Гонец 44 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 360°)	4 ч 36 мин	4 ч 16 мин	3 ч 56 мин	3 ч 36 мин	3 ч 16 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		28,4 мин				

Таблица 14 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 16 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° для «абонента Африка»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	2 ч 35 мин	2 ч 15 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин	1 ч 15 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 90°)	1 ч 33 мин	1 ч 13 мин	53 мин	33 мин	13 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 180°)	1 ч 6 мин	46 мин	26 мин	6 мин	1 ч 44 мин

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
4	Доп. Гонец 14 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 270°)	35,5 мин	15,5 мин	1 ч 54 мин	1 ч 34 мин	1 ч 14,5 мин
5	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	3 ч 50 мин	3 ч 30 мин	3 ч 10 мин	2 ч 50 мин	2 ч 30 мин
6	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 120°)	3 ч 21 мин	3 ч 1 мин	2 ч 41 мин	2 ч 21 мин	2 ч 1 мин
7	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 210°)	4 ч 40 мин	4 ч 20 мин	4 ч	3 ч 40 мин	3 ч 20 мин
8	Доп. Гонец 24 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 300°)	3 ч 45 мин	3 ч 25 мин	3 ч 5 мин	2 ч 45 мин	2 ч 25 мин
9	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	7 ч 35 мин	7 ч 15 мин	6 ч 55 мин	6 ч 35 мин	6 ч 15 мин
10	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 150°)	1 ч 52 мин	1 ч 32 мин	1 ч 12 мин	52 мин	32 мин
11	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 240°)	1 ч 1 мин	41 мин	21 мин	1 мин	8 ч 50 мин
12	Доп. Гонец 34 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 330°)	21 мин	1 мин	8 ч 3 мин	7 ч 43 мин	7 ч 23 мин
13	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	17 мин	9 ч 1 мин	8 ч 41 мин	8 ч 21 мин	8 ч 1 мин
14	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 180°)	1 ч 1,5 мин	41,5 мин	21,5 мин	1,5 мин	1 мин
15	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 270°)	1 ч 43 мин	1 ч 23 мин	1 ч 3 мин	43 мин	23 мин
16	Доп. Гонец 44 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 360°)	2 ч 15 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин	1 ч 15 мин	55 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		8,2 мин				

Таблица 15 – Результаты имитационного моделирования по оценке времени задержки распространения информации для ОГ «Гонец» в составе 16 КА на низкой орбите (1500 км) с наклонением 82,5° для «абонента Австралия»

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
1	Гонец 11 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 0°)	6 ч 8 мин	5 ч 48 мин	5 ч 28 мин	5 ч 8 мин	4 ч 48 мин
2	Гонец 12 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 90°)	7 ч 39 мин	7 ч 19 мин	6 ч 59 мин	6 ч 39 мин	6 ч 19 мин
3	Гонец 13 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 180°)	7 ч 8 мин	6 ч 48 мин	6 ч 28 мин	6 ч 8 мин	5 ч 48 мин
4	Доп. Гонец 14 (наклон 1 плоскости 0°, аргумент перигея 270°)	6 ч 38 мин	6 ч 18 мин	5 ч 58 мин	5 ч 38 мин	5 ч 18 мин
5	Гонец 21 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 30°)	9 ч 54 мин	9 ч 34 мин	9 ч 14 мин	8 ч 54 мин	8 ч 34 мин
6	Гонец 22 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 120°)	9 ч 22 мин	9 ч 2 мин	8 ч 42 мин	8 ч 22 мин	8 ч 2 мин
7	Гонец 23 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 210°)	46 мин	26 мин	6 мин	9 ч 45 мин	9 ч 25 мин

№ п/п	Параметры КА «Гонец»	Время доставки информации на территорию РФ				
		0 момент времени	задержка на 20 мин	задержка на 40 мин	задержка на 60 мин	задержка на 80 мин
8	Гонец 24 (наклон 2 плоскости 45°, аргумент перигея 300°)	21 мин	1 мин	9 ч 35 мин	9 ч 15 мин	8 ч 55 мин
9	Гонец 31 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 60°)	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин	46 мин	26 мин
10	Гонец 32 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 150°)	5 ч 13 мин	4 ч 53 мин	4 ч 33 мин	4 ч 13 мин	3 ч 53 мин
11	Гонец 33 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 240°)	2 ч 55 мин	2 ч 35 мин	2 ч 15 мин	1 ч 55 мин	1 ч 35 мин
12	Доп. Гонец 34 (наклон 3 плоскости 90°, аргумент перигея 330°)	2 ч 26 мин	2 ч 6 мин	1 ч 46 мин	1 ч 26 мин	1 ч 6 мин
13	Гонец 41 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 90°)	1 ч 44 мин	1 ч 24 мин	1 ч 4 мин	44 мин	24 мин
14	Гонец 42 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 180°)	3 ч 6 мин	2 ч 46 мин	2 ч 26 мин	2 ч 6 мин	1 ч 46 мин
15	Гонец 43 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 270°)	2 ч 38 мин	2 ч 18 мин	1 ч 58 мин	1 ч 38 мин	1 ч 18 мин
16	Доп. Гонец 44 (наклон 4 плоскости 135°, аргумент перигея 360°)	6 ч 21 мин	6 ч 1 мин	5 ч 41 мин	5 ч 21 мин	5 ч 1 мин
Среднее время доставки информации для «абонента США»		19,2 мин				

Выводы

По результатам имитационного моделирования и полученных статистическими методами количественных оценок можно сделать вывод, что для уменьшения среднего времени доведения информации от источника к получателю целесообразно использовать преимущества сочетания ОГ КА на НО с ОГ КА на ГСО.

КА на низких круговых орбитах имеют малые временные задержки на распространение радиосигнала, небольшие значения затуханий на трассе распространения радиосигнала, а также возможность работы с абонентами в Северных широтах и приполярных областях [11-24]. В свою очередь, для КА на ГСО, напротив, характерны существенные временные задержки на распространение радиосигнала, высокие значения затуханий на трассе распространения радиосигнала, а также возможность непрерывной работы в пределах глобальной зоны обслуживания КА (за исключением Северных широт и приполярных областей).

При взаимодействии ОГ КА на различных орбитах достигается скрытый экономический эффект, заключающийся в возможности использования меньшего количества КА для решения поставленных целевых задач с той же эффективностью.

На основе анализа результатов моделирования, представленных в таблицах 12, 13, 14, 15, сделаем краткие выводы.

Оперативность доставки информации от источника сообщения к его получателю с использованием ОГ КА «Гонец» зависит:

- 1) от заданных орбитальных параметров ОГ КА «Гонец»;

- 2) равномерного/неравномерного расположения КА «Гонец» в каждой орбитальной плоскости;
- 3) исходного расположения ОГ КА «Гонец» в момент начала моделирования;
- 4) взаимного расположения источника сообщения и его получателя;
- 5) близости к полюсам/экватору источника сообщения.

Взаимодействие ОГ КА «Гонец» с ОГ КА «Луч» позволяет существенно сократить среднее время доставки сообщения его получателю:

- 1) для источника сообщения в США – в 2,76 раза;
- 2) для источника сообщения в Южной Америке – в 2,36 раза;
- 3) для источника сообщения в Африке – в 1,36 раза;
- 4) для источника сообщения в Австралии – в 1,16 раза.

С одной стороны, результаты моделирования показывают, что среднее время доведения информации до конечного потребителя при функционировании низкоорбитальной группировки в составе 16 КА для передатчиков, расположенных в США и Африке соответственно, составляет 1,3 и 8,2 мин, что меньше среднего времени доведения информации для случая прямой ретрансляции через КА «Луч», расположенного на ГСО, в 1,3 и 1,95 раза соответственно. С другой стороны, среднее время доведения информации до конечного потребителя при функционировании низкоорбитальной группировки в составе 16 КА для передатчиков, расположенных в Южной Америке и Австралии соответственно, составляет 28,4 и 19,2 мин, что больше среднего времени доведения информации для случая прямой ретрансляции через КА «Луч», расположенного на ГСО, в 1,87 и 1,2 раза соответственно.

Дополнительные расчеты показали, что для районов Южной Америки и Австралии для уменьшения среднего времени доведения информации до требуемого значения (15,2 и 16 мин соответственно) необходимо увеличение ОГ КА до 20 шт. (при равномерном распределении по орбитальным плоскостям), т.е. на 8 КА относительно исходной ОГ.

Таким образом, относительный экономический эффект от использования межспутниковых линий связи «Гонец-Луч» составляет не менее 8 КА типа «Гонец».

Литература

1. Мальцев Г. Н., Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмоллов А. Ф., Ефимов С. Н., Косаревиц Д. В., Викторов Е. А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2011. № 630. С. 5–10.
2. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмоллов А. Ф. Динамическое перераспределение пропускной способности коммутируемого спутникового моноканала при использовании протоколов множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 47–50.
3. Цветков К. Ю., Акмоллов А. Ф., Викторов Е. А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной

системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 63–70.

4. Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н., Викторов Е. А., Веремчук А. С. Децентрализованный алгоритм расширяющегося поиска абонентов многоспутниковой системы связи // i-methods. 2015. Т. 7. № 4. С. 21–26.

5. Акмолов А. Ф., Ковальский А. А., Ефимов С. Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разнорысотной орбитальной группировки // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 22–31.

6. Ковальский А. А., Митряев Г. А., Новиков Е. А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 68–76.

7. Мануйлов Ю. С. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 2010. – 266 с.

8. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных / под ред. А. И. Галькевича. – Тамбов: Издательство Юлис, 2011. – 169 с.

9. Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Выгонский Ю. Г., Кузовников А. В., Мухин В. А., Чеботарев В. Е., Сомов В. Г. Космические системы ретрансляции: монография – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с.

10. Пантенков Д. Г. Технические характеристики бортовых ретрансляторов космических аппаратов для обеспечения загоризонтной радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5 (9). С. 58–74.

11. Пантенков Д. Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5 (10). С. 20–30.

12. Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П. Алгоритмы формирования и обработки радиосигналов командно-телеметрической радиолинии и технические предложения по их реализации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 90–105.

13. Великоиваненко В. И., Гусаков Н. В., Донченко П. В., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г., Соколов В. М. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 2 (75). С. 48–56.

14. Вейко А. В., Великоиваненко В. И., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г., Константинов В. С., Тюрина Д. Д. Методический подход оценки компенсации доплеровского смещения частоты в спутниковых линиях информационного обмена при эксплуатации космических систем связи // Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов. 2018. № 13. С. 289–297.

15. Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П. Компьютерное моделирование передачи полезной информации в спутниковых радиолиниях при многолучевой связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3-1. С. 127–131.

16. Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Соколов В. М. Методика интегральной оценки эффективности решения комплекса целевых задач космическим аппаратом многоцелевой космической системы // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей ученых степеней ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина». – Химки, 2013. Вып. 14. С. 65-86.

17. Бузов А. Л. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов: монография – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с.

18. Кузовников А. В. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции. – М.: Радиотехника, 2015. – 216 с.

19. Журавлев В. И. Цифровая фазовая модуляция: монография – М.: Радиотехника, 2012. – 208 с.

20. Немировский М. С. Основы построения систем спутниковой связи: монография – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 432 с.

21. Егоров А. Т., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19-26.

22. Ломакин А. А., Пантенков Д. Г., Соколов В. М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37-48.

23. Долженков Н. Н., Абрамов А. В., Егоров А. Т., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г. Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата // Патент на полезную модель RU 191165, опубл. 26.07.2019, бюл. № 21.

24. Тюлин А. Е., Бетанов В. В., Ларин В. К. Информационное обеспечение управления космическими аппаратами. Системный подход к решению задач. – М.: Радиотехника, 2019. – 272 с.

References

1. Maltsev G. N., Tsvetkov K. Yu., Rodionov A. V., Akmolov A. F., Efimov S. N., Kosarevich D. V., Viktorov E. A. Konceptcija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svjazi s mobil'nymi abonentami [The Concept of Building a Different-Height Multi-Satellite Communication System with Mobile Subscribers]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, Saint Petersburg, 2011, no. 630, pp. 5-10 (in Russian).

2. Tsvetkov K. Yu., Rodionov A. V., Akmolov A. F. Dinamicheskoe pereraspredelenie propusknoj sposobnosti kommutiruемого sputnikovogo monokanala pri ispol'zovanii protokolov mnozhestvennogo dostupa [Dynamic Redistribution of the Throughput of a Switched Satellite Single-Channel Using

Multiple Access Protocols]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 5, pp. 47-50 (in Russian).

3. Tsvetkov K. Yu., Akmolov A. F., Viktorov E. A. Model' kanala upravlenija peredachej smeshannogo trafika rechi i dannyh v raznovysotnoj sisteme sputnikovoj svyazi [Model of a Channel for Controlling the Transmission of Mixed Voice and Data Traffic in a Different-Altitude Satellite Communication System]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2012, no. 3, pp. 63-70 (in Russian).

4. Akmolov A. F., Efimov S. N., Viktorov E. A., Veremchuk A. S. Decentralizovannyj algoritm rasshirjajushhego poiska abonentov mnogosputnikovoj sistemy svyazi [Decentralized Algorithm of Expanding Search for Subscribers of a Multi-Satellite Communication System]. *i-methods*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 21-26 (in Russian).

5. Akmolov A., Kovalsky A., Efimov S. Predlozheniia po sozdaniiu i funktsionirovaniu mnogosputnikovoi sistemy svyazi na osnove raznovysotnoi orbital'noi gruppirovki [Proposals for the Establishment and Operation of a Multi-satellite Communications System Based on a Different Orbital Constellation]. *Proceedings of Telecom Universities*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 22-31 (in Russian).

6. Kovalsky A. A., Mitryaev G. A., Novikov E. A. Konceptija postroeniya raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svyazi s mobil'nymi abonentami [The Concept of Building a Multi-altitude Multi-Satellite Communication System with Mobile Subscribers]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 666, pp. 68-76 (in Russian).

7. Manuylov Yu. S. *Sistemnyj analiz i organizacija avtomatizirovannogo upravlenija kosmicheskimi apparatami* [System Analysis and Organization of Automated Spacecraft Control]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2010. 266 p. (in Russian).

8. Galkevich A. I. *Nizkoorbital'naja kosmicheskaja sistema personal'noj sputnikovoj svyazi i peredachi dannyh* [Low-orbit Space System for Personal Satellite Communication and data Transmission]. Tambov, Publishing house Yulis, 2011. 69 p. (in Russian).

9. Testodov N. A., Kosenko V. E., Vygonsky Yu. G., Kuzovnikov A. V., Muhin V. A., Chebotarev V. E., Somov V. G. *Kosmicheskie sistemy retransl'jicii* [Space Relay Systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2017. 448 p. (in Russian).

10. Pantenkov D. G. Tehnicheskie harakteristiki bortovyh retransljatorov kosmicheskikh apparatov dlja obespecheniya zagorizontnoj radiosvyazi s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Technical Characteristics of On-Board Repeaters of Spacecraft for Providing off-Horizon Radio Communication with Unmanned Aerial Vehicles]. *Radiotekhnika*, 2020, Vol. 84, no. 5 (9), pp. 58-74 (in Russian).

11. Pantenkov D. G. Rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya pomehoustojchivosti sputnikovyh sistem radiosvyazi pri vozdejstvii prednamerennyh pomeh [Results of Mathematical Modeling of Noise Immunity of Satellite Radio Communication Systems under the Influence of Intentional Interference]. *Radiotekhnika*, 2020, Vol. 84, no. 5 (10), pp. 20-30 (in Russian).

12. Pantenkov D. G., Litvinenko V. P. Algoritmy formirovaniya i obrabotki radiosignalov komandno-telemetricheskoj radiolinii i tehnicheckie predlozhenija po ih

realizacii [Algorithms for the Formation and Processing of Radio Signals of the Command and Telemetry Radio Line and Technical Proposals for Their Implementation]. *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2020, Vol. 16, no 2, pp. 90-105 (in Russian).

13. Velikoivanenko V. I., Gusakov N. V., Donchenko P. V., Lomakin A. A., Pantenkov D. G., Sokolov V. M. Sistema sputnikovoj svjazi s posledovatel'ny'm zonal'ny'm obsluzhivaniem [Satellite Communication System with Sequential Zone Maintenance]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no. 2 (75), pp. 48-56 (in Russian).

14. Veiko A. V., Velikoivanenko V. I., Lomakin A. A., Pantenkov D. G., Konstantinov V. S., Tyurina D. D. Metodicheskij podhod ocenki kompensacii doplerovskogo smeshhenija chastoty v sputnikovyh liniyah informacionnogo obmena pri jekspluatacii kosmicheskikh sistem svjazi [Methodological Approach to Assessing Doppler Frequency Offset Compensation in Satellite Communication Lines During the Operation of Space Communication Systems]. *Problematic issues of development of ground complexes, launch equipment and operation of aircraft*, 2018, no 13, pp. 289-297 (in Russian).

15. Pantenkov D. G., Litvinenko V. P. Komp'juternoe modelirovanie peredachi poleznoj informacii v sputnikovyh radiolinijah pri mnogoluchevoj svjazi [Computer Modeling of Useful Information Transmission in Satellite Radio Lines in Multi-Path Communication]. *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2013, Vol. 9, no 3-1. pp. 127-131 (in Russian).

16. Pantenkov D. G., Gusakov N. V., Sokolov V. M. Metodika integral'noj ocenki jeffektivnosti reshenija kompleksa celevykh zadach kosmicheskim apparatom mnogocелеvoj kosmicheskoy sistemy [Methodology of Integral Assessment of the Efficiency of Solving a Complex of Target Problems by a Spacecraft of a Multi-Purpose Space System]. *Actual Problems of Designing of Space Systems and Complexes. Collection of Scientific Works of Graduate Students and Competitors of Scientific Degrees*. Khimki, 2013, Vol. 14, pp. 65-86 (in Russian).

17. Buzov A. L. *Special'naja radiosvjaz'. Razvitie i modernizacija oborudovaniya i obektov* [Special Radio Communication. Development and Modernization of Equipment and Facilities]. Moscow, Radiotekhnika, 2017. 448 p. (in Russian).

18. Kuzovnikov A. V. *Sovremennye tehnologii radiomonitoringa v sputnikovyh sistemah svjazi i retransljacii* [Modern Radio Monitoring Technologies in Satellite Communication and Relay Systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2015. 216 p. (in Russian).

19. Zhuravlev V. I. *Cifrovaja fazovaja moduljacija* [Digital Phase Modulation]. Moscow, Radiotekhnika, 2012. 208 p. (in Russian).

20. Nemirovsky M. S. *Osnovy postroenija sistem sputnikovoj svjazi* [Fundamentals of Satellite Communication Systems]. Moscow, Hot Line-Telecom, 2017. 432 p. (in Russian).

21. Egorov A., Lomakin A., Pantenkov D. Matematicheskie modeli otsenki skrytnosti sputnikovykh kanalov radiosvjazi s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Chast' 1 [Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned

Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 1]. *Proceedings of Telecom Universities*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 19-26 (in Russian).

22. Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Matematicheskie modeli otsenki skrytnosti sputnikovykh kanalov radiosvazi s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Chast' 2 [Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 2]. *Proceedings of Telecom Universities*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 37-48 (in Russian).

23. Dolzhenkov N. N., Abramov A. V., Egorov A. T., Lomakin A. A., Pantenkov D. G. Unmanned Aerial Vehicle Radio Terminal. Patent RF no. 191165, 26.07.2019 (in Russian).

24. Tyulin A. E., Betanov V. V., Larin V. K. *Informacionnoe obespechenie upravleniya kosmicheskimi apparatami. Sistemnyj podhod k resheniju zadach* [Information Support for Spacecraft Control. A Systematic Approach to Solving Problems]. Moscow, Radiotekhnika, 2019. 272 p. (in Russian).

Статья поступила 30 октября 2020 г.

Информация об авторе

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук. Заместитель главного конструктора по радиосвязи. АО «Кронштадт». Область научных интересов: космические аппараты; комплексы средств радиосвязи для БПЛА; спутниковая радиосвязь; эффективность целевого применения комплексов с БПЛА; стендовые, наземные и летные испытания комплексов с БПЛА. E-mail: pantenkov88@mail.ru

Адрес: 115432, Россия, г. Москва, Андропова пр., д. 18, кор. 9.

Simulation and Comparative Analysis of Transmission Timeliness Source-to-Recipient Information in a Two-Tier System Satellite Communications Using Spacecraft in Low and Geostationary Orbits

D. G. Pantenkov

Relevance. Currently, satellite information transmission systems are widely used, which allow for the organization of radio information exchange of data at significant distances from each other of the source of the message and its recipient, as well as for the continuous servicing of settlements that are inaccessible or remote from the main infrastructure, in this setting the tasks of satellite communication systems have little alternative. Satellite communication and information relay systems differed in different technical parameters, but were primarily the orbit in which they operated. Low-orbit (LO) space vehicle (SV) of such well-known satellite communication systems as «Iridium», «Globalstar», «Orbcomm» and «Gonets», on the one hand, have a number of advantages compared to SV in geostationary earth orbit (GEO): there are no large time delays for the propagation of the radio signal, significantly less. On the other hand, for example, for the orbital constellation (OC) of the «Gonets» SV, which does not have inter-satellite information transmission lines between the «Gonets» SV inside the OC, there may be substantial waiting periods for information to be transmitted from the moment the SV receives it until the message is reset to the recipient. **The purpose of the work** is to simulate in the «Satellite Tool Kit» application software the

*timeliness of transmitting information from the SV orbital constellation in low orbits to the end user for the case without using the SV repeater on the GEO and for the case of joint operation of the SV on the LO and GEO. As an example of a SV on the GEO, the «Luch» SV is used, and the «Gonets» SV is used as a SV on the LO. **Results.** The article presents the numerical values of timeliness of information transmission obtained according to the results of the simulation - the average time for bringing information from arbitrarily located sources of a message to its recipient in the territory of the Russian Federation. The economic effect of using the retransmission of information from LO vehicles through the SV on the GEO is to reduce the required number of SV in low orbit. **The novelty element of the work** is the approach to determining the minimum required composition of OC SV for transmitting information from source to recipient based on software simulation methods. **The practical significance** of this approach lies in the fundamental technical possibility of analyzing the options for building a SV in various orbits and assessing their rationality according to various private criteria even at the stage of conducting a research or advance project in preparation for scientific research, which will make it possible to lay down when forming a tactical and technical task the critical required number of SV from the space system, having solved the given technical task and saving financial resources*

Keywords: space vehicle, low-orbital space systems, geostationary orbit, hierarchical system, information relay, average information transmission time, simulation, inter-satellite communication lines, «Gonets», «Luch».

Information about Author

Dmitrii Gennad'evich Pantenkov – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the department of radiocommunication systems. JSC «Kronstadt». Field of research: space vehicles; radio communication systems for UAVs; satellite radio communication; effectiveness of targeted use of UAV complexes; bench, ground and flight tests of UAV complexes. E-mail: pantenkov88@mail.ru

Address: Russia, 115432, Moscow, Andropova prospect, 18, build. 9.