

Оценка состояния орбитальной группировки системы связи Globalstar и связанных с ним ограничений в обслуживании абонентов

Assessment of the "Globalstar" constellation and related limitation of subscribers services



Александр Акимов

Главный специалист,
ЦНИИ экономики, информатики
и систем управления

Aleksandre Akimov

Chief specialist,
CSRI of economics informatics
and management systems



Вадим Чазов

Отдел астрометрии и службы
времени, ГАИ им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., с.н.с.

Vadim Chazov

SAI MSU, senior research, doctor
science



Леонид Курахтенков

Заведующий лабораторией
НИЧ МТУСИ, к.т.н.

Leonid Kurakhtenkov

Head of the laboratory at SRD
MTUCI, Ph.D.



Святослав Смирнов

Ведущий инженер
ОАО "РТКОММ.РУ"

Svyatoslav Smirnov

Leading Engineer
JSC "RTComm.RU"

История развития системы персональной подвижной спутниковой связи Globalstar составляет 18 лет. За это время произошли события, сильно повлиявшие на облик системы связи. В период развертывания разработчики системы достаточно полно предоставляли техническую информацию о системе, что позволяло судить о ее возможностях. Однако в последнее время после анонсирования второго поколения системы – Globalstar-2 – поток технической информации существенно сократился. Поэтому проведенный по состоянию на январь 2016 г. анализ дает представление о сложившемся состоянии орбитальной группировки системы и связанных с ним ограничениях в обслуживании абонентов системы. В работе приводятся результаты, полученные путем имитационного моделирования, на основе исходных данных, имеющихся в открытом доступе.

Personal mobile satellite communication system Globalstar has 18 years of development history. During this time different events strongly influenced the shape of this communication system. During the initial deployment, engineers provided vast amount of technical information about system, allowing it to judge its capabilities. However recently after the announcement of next generation constellation – Globalstar-2 the flow of technical information has declined significantly. Conducted by of January 2016 analysis gives an idea of current constellation status and related restrictions in the subscribers services.

All results in this report are obtained by computer the simulation, on the basis of raw publicly available data.

Ключевые слова:

низкоорбитальная система связи, орбитальная группировка, отказ космических аппаратов, непрерывность соединения, время ожидания, зоны обслуживания, Globalstar

Keywords:

Low Earth Orbit, satellite communication system, constellation, satellite vehicle failure, uninterrupted connectivity, latency or delay, coverage, Globalstar

Историческая справка

Создание космической системы персональной спутниковой связи Globalstar было начато в 1991 г. двумя американскими компаниями Loral Aerospace Corporation и QUALCOMM Incorporated. Первый запуск космических аппаратов (КА) системы состоялся 14 февраля 1998 г. Ракета-носитель (РН) Delta вывела на орбиту первые 4 КА: Globalstar FM 1, FM 2, FM 3, FM 4.

Всего на этапе развертывания произведено 14 стартов РН. Из них 1 был аварийным (РН "Зенит-2", 12 КА), 7 успешных РН Delta по 4 КА и 6 – РН "Союз" по 4 КА. Развертывание орбитальной группировки завершилось 8 февраля 2000 г., когда РН Delta на орбиту вывел 4 КА: Globalstar M060, M062, M063, M064. Срок активного существования (САС) КА Globalstar составлял 7 лет.

Этап развертывания системы сопровождался заметной информационной кампанией. В то время шел активный процесс согласования использования радиочастот и строительства земных базовых станций (БС) системы на территории ряда государств (всего 27), в том числе три БС в Российской Федерации. Был опубликован ряд работ, посвященных анализу эффективности проектов низкоорбитальных систем спутниковой связи [1, 2]. В публикациях анализировалась эффективность системы Globalstar. Результаты этого анализа показывали, что технико-экономические показатели не столь высоки, как это было представлено в многочисленных публикациях рекламной направленности. К этому же периоду относится известное описание системы [3].

Заявленные разработчиками характеристики системы определялись структурой орбитальной группировки, содержащей 48 КА на низких круговых орбитах с наклоном 52 град., высотой 1410 км, расположенных в 8 орбитальных плоскостях по 6 КА. Орбитальная группировка системы обеспечивала однократное 100% гарантированное покрытие поверхности Земли зонами радиовидимости КА 10 град. внутри пояса широт от 74 град. ю.ш. до 74 град. с.ш. Позже, в работе [4], такая полномасштабная орбитальная группировка исследовалась на устойчивость к одиночным и парным отказам КА.

Несмотря на начатую коммерческую эксплуатацию, 15 февраля 2002 г. собственник системы Globalstar и его дочерние компании подали добровольное ходатайство о банкротстве.

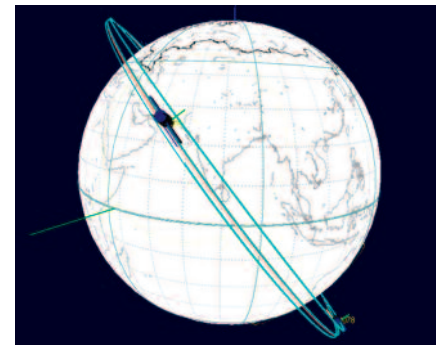
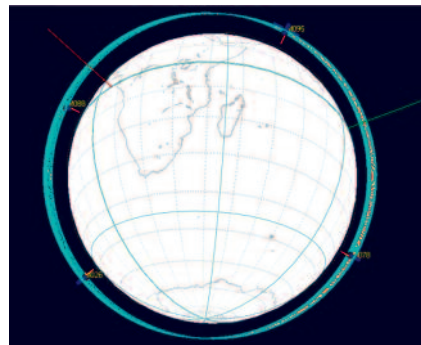


Рис. 1. Точность расположения КА в одной плоскости



Рис. 2. Мгновенное распределение зон радиовидимости по углу места 10 град. для 28 КА, поддерживающих голосовую дуплексную связь

В период с 2002 по 2004 гг. производилась реструктуризация компании. В связи с отсутствием инвестиций развития и поддержания космического сегмента не производилось. Наблюдалась глубокая деградация ОГ. В конце 2006 г. постоянные пользователи услуг сообщали, что время телефонного разговора ограничивается 1–2 минутами из-за разрывов связи, обусловленных отсутствием КА. При этом на сайте компании публиковалось расписание пролетов КА, а также был выпущен специализированный софт, позволяющий рассчитать длительность сеанса связи. Поэтому предоставляемые абонентам системы услуги ограничивались передачей данных и сообщений.

После того, как появился новый владелец бизнеса – ООО Thermo Capital Partners, – ООО Globalstar было переименовано в Globalstar Inc. Также были найдены средства на восполнение ОГ. В декабре 2006 г. Globalstar Inc. объявила о начале создания второго поколения КА, имеющих САС 15 лет, вдвое превышающий САС КА первого поколения. Наконец, в течение 2007 г. двумя стартами РН "Союз-ФГ" по 4 КА первого поколения (29 мая и 20 октября 2007 г.) была возобновлена работа ОГ.

Развертывание ОГ Globalstar-2 началось 19 октября 2010 г. В период с 19 октября 2010 г. по 6 февраля 2013 г. четырьмя запусками российского РН "Союз-2.1а" по 6 КА было выведено 24 КА второго поколения. Однако экономическая эффективность системы принципиально не изменилась [5, 6].

Технический анализ современного состояния ОГ Globalstar

По информации, размещенной на сайте компании, ОГ второго поколения должна состоять из 32 КА, размещаемых в 8 орбитальных плоскостях по 4 КА в каждой [7, 8]. К сожалению, официальная информация об ОГ второго этапа этим и исчерпывается. В [9, 10] отмечалось, что такая орбитальная структура не обеспечивает гарантированного однократного покрытия поверхности Земли зонами радиовидимости КА.

Для оценки характеристик системы, содержащей уменьшенное количество КА в ОГ, необходимо уточнить параметры эксплуатируемой орбитальной структуры и провести соответствующее моделирование. Анализ состояния орбитальной группировки проведем на основе методологии, разработанной в [13, 14, 15], с помощью универсального

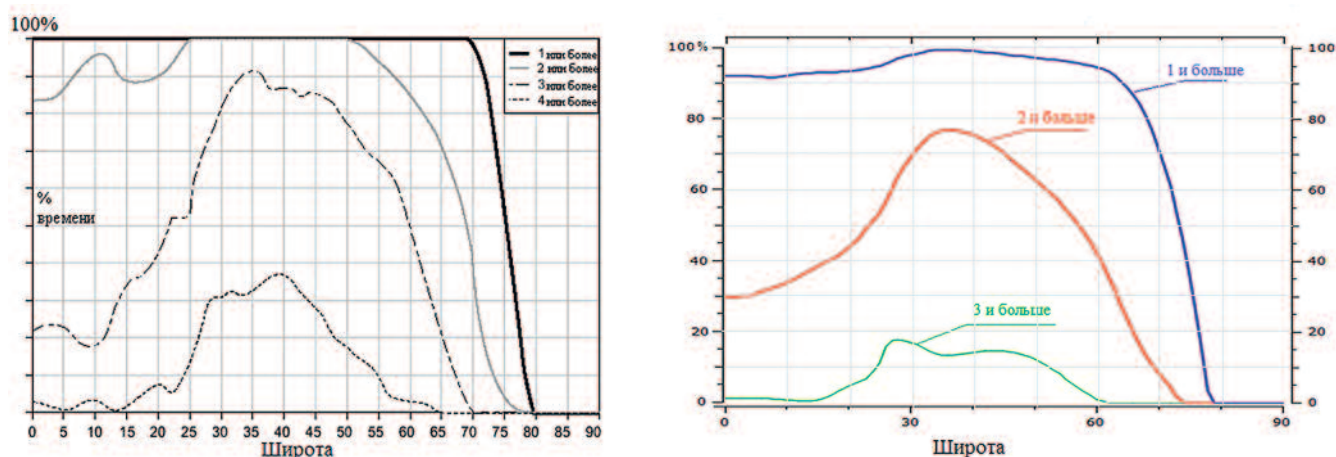


Рис. 3. Доступность созвездий КА ОГ Globalstar в зависимости от широты наблюдения. Углы места видимости КА > 10 град.

Таблица 1. Активные КА Globalstar (по состоянию на январь 2016 г.)

№	Пуск №	№ по Каталогу	Дата	№ Плоскости	Название КА	Активен/Пассивен	Сервис Simplex/Duplex	Носитель
1	2	25307	24.04.1998	5	Globalstar FM 06	A	S	Delta 7420-10C
2	9	25873	25.07.1999	1	Globalstar M026	A	S	Delta II
3	10	25884	17.08.1999	2	Globalstar M027	A	S	Delta 7420-10C
4	12	25944	18.10.1999	5	Globalstar M059	A	S	Союз 11A511U
5	13	25961	22.11.1999	8	Globalstar M039	A	S	Союз 11A511U
6		25963		3	Globalstar M029	A	S	
7	14	26081	08.02.2000	4	Globalstar M063	A	S	Delta 7420-10C
8	15	31571	29.05.2007	7	Globalstar M065	A	S	Союз-ФГ/Фрегат
9		31573	2007	6	Globalstar M069	A	D	
10		31574	2007	8	Globalstar M072	A	D	
11		31576	2007	6	Globalstar M071	A	S	
12	16	32263	20.10.2007	3	Globalstar M067	A	D	Союз-ФГ/Фрегат
13		32264	2007	5	Globalstar M070	A	S	
14		32265	2007	2	Globalstar M066	A	D	
15	17	37188	19.10.2010	5	Globalstar M079	A	D	Союз-2.1a
16		37189	2010	5	Globalstar M074	A	D	
17		37190	2010	5	Globalstar M076	A	D	
18		37191	2010	4	Globalstar M077	A	D	
19		37192	2010	6	Globalstar M075	A	D	
20		37193	2010	4	Globalstar M073	A	D	
21	18	37739	13.07.2011	3	Globalstar M083	A	D	Союз-2.1a
22		37740	2011	1	Globalstar M088	A	D	
23		37741	2011	8	Globalstar M091	A	D	
24		37742	2011	7	Globalstar M085	A	D	
25		37743	2011	7	Globalstar M081	A	D	
26		37744	2011	6	Globalstar M089	A	D	
27	19	38040	28.12.2011	3	Globalstar M084	A	D	Союз-2.1a
28		38041	2011	3	Globalstar M080	A	D	
29		38042	2011	2	Globalstar M082	A	D	
30		38043	2011	4	Globalstar M092	A	D	
31		38044	2011	2	Globalstar M090	A	D	
32		38045	2011	2	Globalstar M086	A	D	
33	20	39072	06.02.2013	8	Globalstar M097	A	D	Союз-2.1a
34		39073	2013	8	Globalstar M093	A	D	
35		39074	2013	6	Globalstar M094	A	D	
36		39075	2013	7	Globalstar M096	A	D	
37		39076	2013	1	Globalstar M078	A	D	
38		39077	2013	1	Globalstar M095	A	D	

комплекса имитационного моделирования спутниковых систем [16, 17]. Для этого воспользуемся исходными данными в формате TLE, которые могут быть получены через официаль-

ные специализированные интернет-сервисы [11]. Уточнение состояния КА проводилось путем анализа истории аномалий движения, обусловленных коррекциями орбиты. КА, для которых

не проводилась коррекция положения на протяжении года, признавались неисправными. Также принималась во внимание дополнительная информация о задействованных КА. Получен-

ные результаты представлены в таблице 1. Из таблицы 1 следует, что активными в настоящее время являются 38 КА. Из них 10 КА предоставляют услуги не в полном объеме. По терминологии Globalstar они реализуют режим Simplex. Очевидно, что выделение в отдельный перечень такого рода услуг позволяет использовать остаточный ресурс КА, которые вышли за пределы САС, но сохраняют ограниченную работоспособность. Такие КА используются в основном для получения сообщений от мобильных абонентов, например сигналов бедствия, или передачи им коротких сообщений. В таблице 1 в колонке "Сервис" эти КА отмечены символом S. Из таблицы также видно, что КА первого поколения, выведенные на орбиту в 2007 г., к настоящему времени находятся далеко за пределами САС. КА второго поколения, выведенные на орбиту с 2010 г., находятся в удовлетворительном состоянии, поддерживают целевой полнофункциональный сервис, включающий голосовую телефонную связь и все другие виды услуг. По терминологии Globalstar такие КА поддерживают режим Duplex. В таблице 1 в колонке "Сервис" они отмечены символом D. Всего полнофункциональные услуги предоставляют 28 КА, включая 4 КА первого поколения, которые уже работают за пределами САС.

Таким образом, вскоре по мере деградации КА M066, M067, M069, M072 ОГ потребует восполнения до заявленных 32 КА.

В сводной таблице 2 приведены номера КА по каталогу и установлена их принадлежность конкретным орбитальным плоскостям. Идентификация производилась путем имитационного моделирования движения ОГ КА на

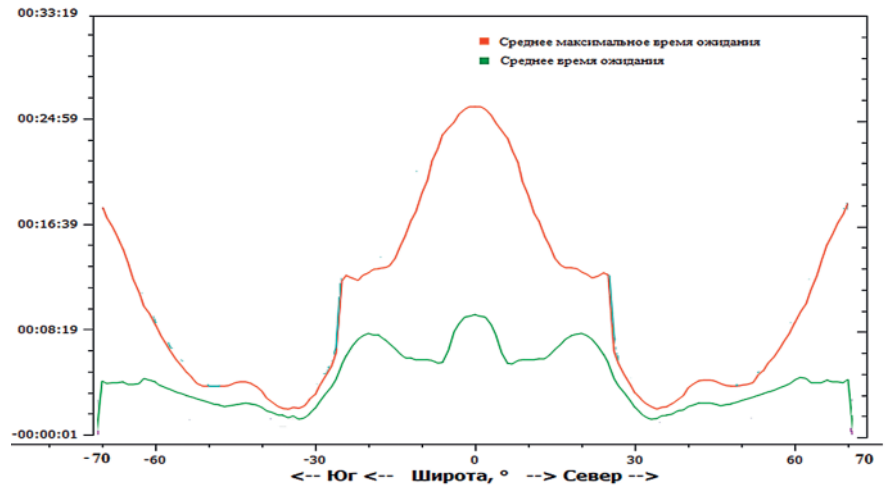


Рис. 4. Среднее максимальное и среднее время ожидания подлета КА Globalstar

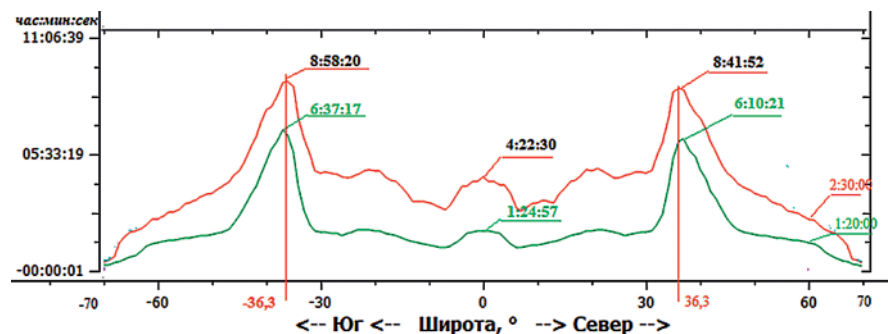


Рис. 5. Максимальное и среднее время ожидания обрыва связи из-за отсутствия КА Globalstar. Результаты усреднены по долготе

основе начальных условий, представленных в формате TLE. Из таблицы 2 следует, что выведенные одним пуском КА находятся в различных орбитальных плоскостях. Таким образом, в процессе разведения КА использовался эффект дрейфа долготы восходящего узла орбит с наклонением 52 град. [12]. При этом высота переходной орбиты составляет 925–930 км. Анализ истории начальных условий движения КА

показал, что время пребывания на переходной орбите для перевода в другую плоскость для разных КА варьируется от 13 до 390 суток.

Результаты расчета положения КА в плоскостях показывают, что погрешность попадания в плоскость по долготе восходящего узла может составлять несколько градусов (см. рис. 1 слева). Также несколько градусов может составлять погрешность установки КА по средней аномалии внутри орбитальной плоскости (см. рис. 1 справа).

Таблица 2. Распределение КА ОГ Globalstar по орбитальным плоскостям (красным цветом выделены КА, поддерживающие режим Duplex, черным цветом – режим Simplex)

Плоскость	1	2	3	4	5	6	7	8
Norad №	37740	32265	32263	37191	37188	31573	37742	31574
Norad №	39076	38042	37739	37193	37189	37192	37743	37741
Norad №	39077	38044	38040	38043	37190	37744	39075	39072
Norad №	25873	38045	38041	26081	25307	39074	31571	39073
Norad №	-	25884	25963	-	25944	31576	-	25961
Norad №	-	-	-	-	32264	-	-	-

Таблица 3. Величина дрейфа долготы восходящего узла переходной и рабочей орбиты КА Globalstar

Величина дрейфа ДВУ КА	На переходной орбите (град.)	На рабочей орбите (град.)	Между плоскостями (град.)
За сутки	-3,83	-3,04	-0,782
За 30 суток	-114,78	-91,34	-25,44
За 365 суток	-1396,49	-1111,25	-285,24

Потенциальная область доступности полнофункциональных КА

КА, поддерживающие полнофункциональный сервис, перечислены в таблице 1. На рис. 2 для них показано мгновенное распределение зон радиовидимости по углу места 10 град. Расчет выполнен на дату 02.02.2016 и время 10:27:06.

На рис. 2 одинаковым цветом показаны мгновенные зоны радиовидимости КА для угла места 10 град., принадлежащие одной плоскости ОГ. Серым цветом выделены мгновенные области с отсутствующим покрытием.

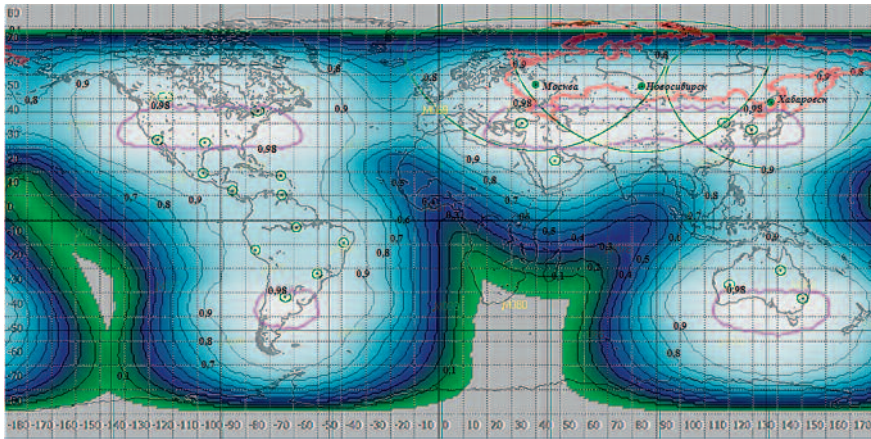


Рис. 6. Зона обслуживания системы Globalstar, вычисленная с учетом ОГ, состоящей из 28 КА и 23 земных базовых станций

Именно области полного отсутствия КА внутри заявленной зоны обслуживания определяют время ожидания абонентами предоставления услуги телефонной связи и ответственны за обрывы связи.

На рис. 3 слева показано распределение пространственной доступности ОГ из 48 КА, а справа показано распределение пространственной доступности КА ОГ текущего этапа из 28 КА. Из рис. 3 следует, что ОГ не обеспечивает гарантированного предоставления голосового телефонного сервиса в заявленной зоне обслуживания системы. Кроме того, зависимость вероятности возникновения созвездий из не менее чем 2 КА от широты показывает, что оптимально обслуживается пояс широт от 35 до 45 град. Одновременно можно заключить, что насыщенность ОГ КА недостаточна для эффективного использования технологии Rake приема, заявленного как одно из технологических преимуществ системы, обеспечивающих устойчивую связь. Насыщенности ОГ едва хватает для обеспечения переключения абонентов со спутника на спутник. Созвездия, пригодные для решения задачи определения координат абонентов дальномерным методом и состоящие из 3 КА, в существующей ОГ возникают совсем редко, а севернее 60 град. с.ш. практически никогда.

Время пребывания земных точек в условиях отсутствия над ними хотя бы одного КА, видимого под углами места больше 10 град., характеризует рис. 4. Он показывает, что в среднем абонентами будут наблюдаться времена ожидания подлета КА:

- до 9 минут, а максимальное время ожидания составит до 16 минут внутри по краям области широт от 70 град. ю.ш. до 70 град. с.ш.;

- до 25 минут в экваториальной области.

В приполярных областях на широтах выше 70 град. в связи с проектными ограничениями время ожидания подлета КА, видимых под углами места больше 10 град., возрастает до бесконечности.

На рис. 5 показана зависимость от широты максимального и среднего времени ожидания обрыва связи из-за отсутствия над абонентом хотя бы одного КА Globalstar, видимого под углом места не меньше 10 град.

Таким образом, из рис. 5 следует, что максимальная длительность установленного непрерывного соединения (с учетом хэндовера) для территории Российской Федерации в зависимости от широты расположения абонентов будет колебаться максимально от 3,5 до 2,5 часов, а в среднем от 1,7 до 1 часа. Ситуация полного отсутствия КА, как следует из рис. 4, длится от 5 до 15 минут, в зависимости от широты расположения абонентов.

Анализ потенциально реализуемой рабочей зоны с учетом размещения базовых станций

Расчет зон обслуживания системы с учетом расположения земных базовых станций предполагал, что базовые станции в состоянии полноценно работать с КА при углах места 6 град., а абоненты работают с КА, видимыми под углами места 10 град. В расчетах учитывались расположение 23 земных базовых станций и начальные условия для расчета движения 28 КА, обеспечивающих дуплексную телефонную связь. Анализ проводился с помощью универсального комплекса имитационного моделирования спутниковых систем [16, 17]. В результате было получено распределение (см. рис. 5),

градациями цвета показывающее величину коэффициента доступности для абонентов пригодных для организации связи КА. На рис. 5 даны изолинии распределения коэффициента доступности по уровням.

Изолиния максимального уровня равна коэффициенту 0,98, а изолиния минимального уровня равна 0,1. Зеленными точками отмечено расположение базовых станций в районе Москвы, Новосибирска и Хабаровска. Можно видеть, что хотя базовые станции расположены на территории Российской Федерации, уровни максимальной доступности КА для абонентов располагаются за ее пределами. Это является следствием того, что наклонение орбиты системы Globalstar составляет 52 град. и оптимизировано для территории США.

Итоги анализа

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Эксплуатируемая в настоящее время орбитальная группировка КА системы Globalstar содержит 38 активных КА. Из них 28 поддерживают полную дуплексную телефонную связь и все другие виды услуг, а 9 КА предоставляют только услуги передачи данных и коротких сообщений, так как находятся за пределами САС (см. табл. 1).
2. При развертывании ОГ системы используется маневр разведения КА, предусматривающий перевод КА в соседние плоскости. Время выполнения такого орбитального маневра колеблется от двух недель до одного года.
3. Орбитальная группировка системы в связи с оптимизацией расходов реструктурирована до меньшего количества космических аппаратов – 28 по сравнению с исходным проектом, предусматривающим ОГ из 48 КА. Это привело к ухудшению показателей доступности и готовности ОГ к предоставлению услуг абонентам.
4. КА, находящиеся за пределами САС, имеют сниженный ресурс энергии, но продолжают использоваться в режиме передачи данных типа "электронной почты".
5. Наилучшие показатели для зоны обслуживания системы достигаются в широтном поясе расположения США. В других географических зонах доступность КА для абонентов системы снижена.
6. Для различных территорий Российской Федерации могут наблюдаться времена ожидания подлета КА от 5 до 9 минут, а на краях зоны обслуживания до 15 минут.

7. На территории Российской Федерации длительность непрерывного соединения (с учетом хэндовера) может колебаться максимально от 3,5 до 2,5 часов, а в среднем от 1,7 до 1 часа в зависимости от широты расположения точки наблюдения.

Заключение

Результаты проведенного анализа показывают, что надежность работы системы Globalstar по состоянию на 2016 г. не отвечает первоначально заявленным проектным параметрам. Причины этого кроются в недостаточном количестве активных полнофункциональных КА. ■

Литература

1. Бородич С.В. О применении систем спутниковой связи со спутниками на низких орбитах // *Электросвязь*. – 1995. № 9. С. 19–24.
2. Анпилогов В.Р. Эффективность и стоимость универсальных систем подвижной спутниковой связи в "золотых" L- и S-диапазонах частот // *Технологии и средства связи*. – 1999. № 2. С. 78–81.
3. Description of the Globalstar System, December 07, 2000, Globalstar, L.P., 3200 Zanker Road, San Jose, Ca. 95164-0670.
4. Description of the Globalstar System. December 07, 2000. [online] Доступ через: <https://gsproductsupport.files.wordpress.com/2009/04/description-of-the-globalstar-system-gs-tr-94-0001-rev-e-2000-12-07.pdf>.
4. Шевчук Д.В. Иванкович М.В. Оценка изменения интегральной доступности связи для абонентов потребителей негеостационарной спутниковой системы Globalstar при изменении орбитальной группировки // *T-Comm – Телекоммуникации и транспорт*. – 2012. № 2. Изд.дом "Медиапаблшер". С. 26–28.
5. Крылов А.М. Анализ создания и развития низкоорбитальных систем спутниковой связи // *Технологии и средства связи*. – 2010. № 6-2. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание-2011".
6. Анпилогов В.Р. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // *Технологии и средства связи*. – 2015. № 4. С. 62–67.
7. Second-Generation Satellite Constellation. [online] Доступ через: <https://www.globalstar.com/en/index.php?cid=8300>.
8. Sharing between MSS systems using TDMA and MSS systems using CDMA in the band 1610 – 1626.5 MHz. ECC REPORT 95. Bern. February 2007.
9. First four satellites in the Globalstar Second Generation constellation in position and ready for service. February 21, 2011. Thales Alenia Space. Sandrine Bielecki.
10. Sam Churchill. Internet of Things: Divided or United? July 9th, 2014. [online] Доступ через: <http://www.dailywireless.org/category/smartmeters/page/2/>.
11. [online] Доступ через: <http://celestrak.com/NORAD/elements/globalstar.txt>.
12. Степанов А., Акимов А., Чазов В., Гриценко А. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи // *Технологии и средства связи / Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание 2016"*. – 2015. № 6 (111), часть 2. С. 72–74, 76–87.
13. Акимов А.А., Талмуд М.Я., Палкин И.А. Применение метода обобщенных зон для анализа и проектирования систем спутниковой связи. Материалы 2 международной конференции "Спутниковая связь". Т.1. Москва, 1996. С.141–151.
14. Акимов А.А. Особенности размещения наземных станций в системах связи через негеостационарные ИСЗ // *Электросвязь*. – 1998. № 2.
15. Акимов А.А. Новая постановка старой задачи о расчете зон обслуживания систем спутниковой связи // *"Инфосфера"*. № 60, 27 декабря 2013.
16. Аджемов С.С., Кучумов А.А. Универсальный комплекс имитационного моделирования спутниковых систем // *"СатСтат"*, T-Comm. Телекоммуникации и транспорт. – 2008. № 2. Москва. С. 25–28.
17. Аджемов С.С., Кузнецов Г.А., Кучумов А.А. Имитационное моделирование спутниковых телекоммуникационных систем // *Труды МТУСИ*. – Москва, 2007. С.164–167.

Ваше мнение и вопросы по статье
присылайте по адресу

tss@Groteck.ru