

Модификация орбиты "Тундра" для обслуживания территории России и анализ ее устойчивости

Modification of orbit "Tundra" for service in Russia and its stability analysis



Александр Акимов

Главный специалист, ЦНИИ экономики, информатики и систем управления

Aleksandre Akimov

Chief specialist, CSRI of economics informatics and management systems



Денис Шевчук

Независимый эксперт

Denis Shevchuk

Independent expert



Вадим Чазов

С.н.с. отдела астрометрии и службы времени, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н.

Vadim Chazov

Sternberg Astronomical Institute Moscow State University (SAI MSU), senior research, Sternberg Astronomical Institute Moscow State University (SAI MSU), doctor science.

На основе анализа долгосрочной устойчивости орбитальной группировки космических аппаратов системы связи SIRIUS, размещаемых на высокой эллиптической орбите типа "Тундра", определено время существования орбитальной группировки без проведения коррекции и рассматривается возможная модификация параметров орбиты, оптимизированная для территории РФ. Сравниваются модифицированные орбитальные структуры, состоящие из трех и четырех космических аппаратов. Для случая земных станций, оснащенных антеннами с фиксированной ориентацией, оценена требуемая ширина диаграммы направленности, которая покрывает рабочий участок траектории движения космических аппаратов на интервале времени между коррекциями орбиты.

Based on long term sustainability analyses of orbital constellation of "Sirius" satellites, orbiting earth on high elliptic "Tundra" orbits was determined period of constellation functioning without necessity of orbital correction. Further orbit analysis is in progress in order to modify orbital parameter and optimize Russian Territory coverage. Modified orbital structures that consist of three and four satellites being compared. Beamwidth required in order to cover work area of spacecraft trajectory in the interval between orbit corrections were estimated for ground station with fixed antenna orientation.

За последние несколько лет все более активно обсуждаются необходимость и задачи организации связи и вещания в северных регионах России [1]. Достаточно очевидно, что для решения этой задачи следует ориентироваться в основном на спутниковые технологии. В России существует про-

грамма "Арктика" [2]. Но возникает множество проблем экономического и технического характера. В [3] анализируются возможные варианты решения задачи. Наиболее приемлемым решением является создание системы на основе группировки спутников, расположенных на орбите типа "Тундра". Однако в этом случае требуются оптимизация ее параметров применительно к задаче обслуживания территории России и анализ устойчивости группировки спутников.

Об орбите "Тундра"

Идея использования синхронных наклонных орбит (период обращения равен солнечным суткам) для построения системы связи известна достаточно давно, но, видимо, впервые глубоко обсуждалась в 1985 г. [4], а в 1990-м был оформлен патент [5].

В [6] представлены варианты и характеристики систем фиксированной спутниковой службы, использующих высокую околоземную орбиту, в том числе с орбитальным периодом 23

ч 56 мин. и наклоном, близким к орбите "Молния", но более высоким апогеем. Сегодня такие орбиты в литературе обозначены как орбита "Тундра". Орбитальная структура с таким периодом позволяет за счет подбора ее параметров реализовать конвейерное движение космических аппаратов (КА), то есть осуществляется синхронное вхождение нового КА в рабочую область с одновременным выходом из нее уже работавшего в этой области КА. Орбитальная структура типа "Тундра" имеет технико-экономические преимущества перед системами на основе спутников на ГСО не только в высоких широтах (обычно более 35 град.), но и в условиях городской застройки [7], поскольку позволяет обеспечить наблюдение КА с поверхности Земли при больших углах возвышения над горизонтом. Кроме того, в [8] отмечаются достоинства орбиты "Тундра", обусловленные тем, что она располагается выше радиационных поясов Земли. Это позволяет использовать радиационную защиту электронной аппаратуры, типичную для геостационарных КА со сроком службы 15 лет. Отметим, что орбиты типа "Молния" пересекают радиационные пояса Земли вследствие низкого перигея, что сокращает срок службы размещаемых на них КА (или требуется дополнительная защита от радиационного воздействия). Кроме того, можно отметить отсутствие атмосферного торможения и снижение влияния эффекта Доплера [5].

Системы, использующие орбиты "Молния" и "Тундра" часто называют квазигеостационарными, поскольку они потенциально позволяют использовать недорогие неподвижные земные станции, оборудованные антенными системами с фиксированной ориентацией в пространстве. При этом диаграмма направленности антенны земного терминала должна быть такой, чтобы область пространства, в которой находится рабочий участок траекторий космических аппаратов, целиком содержалась в главном лепестке диаграммы направленности антенны [6]. Чем меньше указанная область, тем более узкий луч можно использовать, следовательно, тем выше будет энергетика абонентской радиолинии.

В настоящее время рассматривается возможность построения системы связи в интересах РФ, которая будет использовать орбитальную структуру типа "Тундра" [9].

Поскольку первая подобная система была развернута в США и в

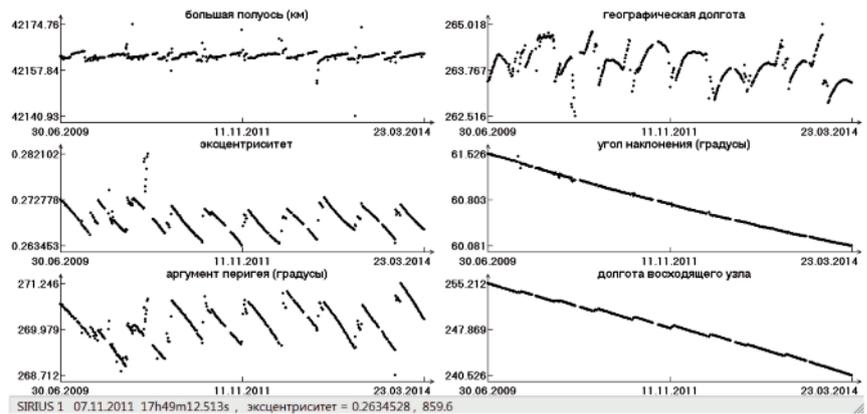


Рис. 1. Эволюция параметров орбиты КА Sirius-1

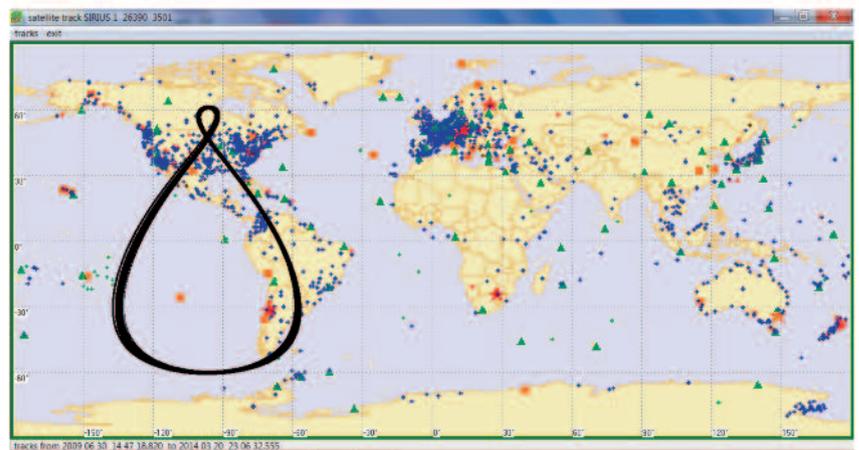


Рис. 2. Трассы подспутниковой точки Sirius-1 за 5 лет полета

Таблица 1. Начальные условия для расчета движения трех КА в орбитальной группировке "Тундра", оптимизированной для территории РФ

N КА	101	201	301
Дата и время НУ	2 января 2012 г. 06:54:32	2 января 2012 г. 14:53:02	2 января 2012 г. 22:51:32
X (км) в ГСК	-23 836,9	-23 836,9	-23 836,9
Y (км) в ГСК	30 987,4	30 987,4	30 987,4
Z (км) в ГСК	14,5336	14,5336	14,5336
Vx скорость в ГСК, км/с	0,601404	0,601404	0,601404
Vy скорость в ГСК, км/с	1,54907	1,54907	1,54907
Vz скорость в ГСК, км/с	2,85522	2,85522	2,85522
* прямоугольная гринвичская система координат (ГСК)			

Таблица 2. Кеплеровские элементы орбиты, соответствующие начальным условиям табл. 1

N КА	101	201	301
Дата и время	3 января 2012 г. 12:51:01	3 января 2012 г. 12:51:01	3 января 2012 г. 12:51:01
Большая полуось, км	42 163,9	42 164,2	42 164,0
Эксцентриситет	0,27	0,27	0,27
Наклонение, град.	63,393	63,341	63,461
Аргумент перигея, град.	270,10	269,95	269,96
Аргумент широты, град.	178,77	89,61	-0,006

настоящее время осуществляет цифровое радиовещание, представляет интерес провести ее анализ на предмет устойчивости орбитальной группировки и уточнения характера ее коррекции, чтобы предложить моди-

фикацию начальных условий для расчета движения КА, которые были бы оптимизированы для территории РФ. Также необходимо оценить улучшение энергетики абонентской радиолинии для орбитальной группировки,

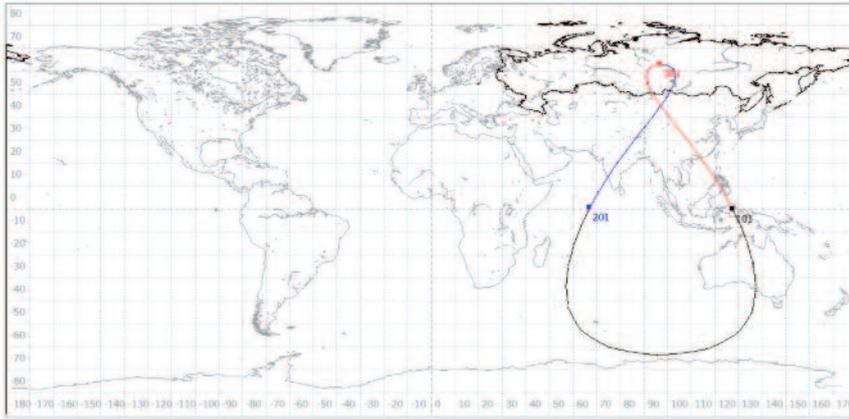


Рис. 3. Фрагмент трасс подспутниковых точек, соответствующий началу модельного интервала времени (табл. 1).

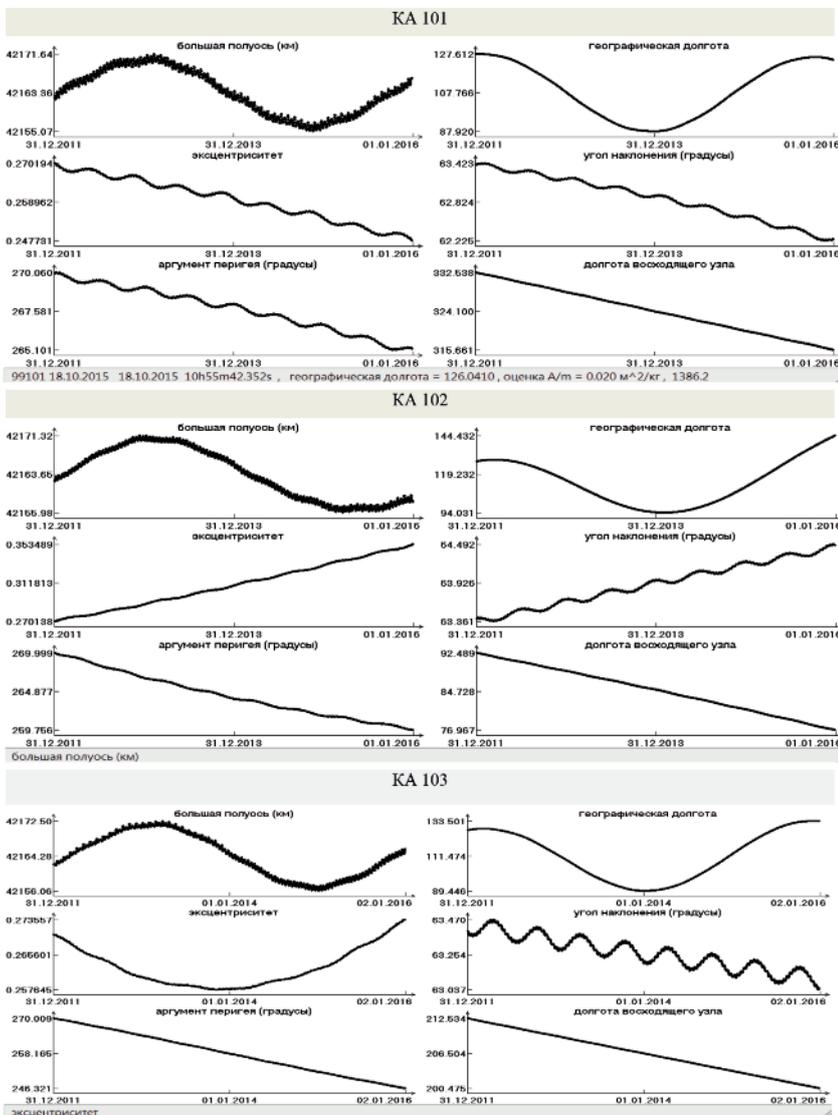


Рис. 4. Эволюции кеплеровских элементов орбиты "Тундра" (три КА)

состоящей из четырех КА, обусловленное уменьшением пространственных размеров рабочего участка траектории, по сравнению с группировкой, содержащей три КА.

Анализ параметров орбитального движения спутников Sirius-1/2/3

Развертывание системы "Сириус Радио" началось с запуска спутника

Sirius-1 с космодрома Байконур 30 июня 2000 г., Sirius-2 был запущен 5 сентября 2000 г., а Sirius-3 – 30 ноября 2000 г. Конструкция КА базировалась на платформе SS/L 1300, обеспечивающей его работоспособность в течение 15 лет. Поскольку элементы орбиты движения КА имеются в открытом доступе [10], можно провести анализ эволюции орбиты за прошедший период.

Путем сопоставления данных различных источников можно установить, что спутник Sirius-1 соответствует объекту № 26390 по каталогу NORAD. Это позволяет получить историю элементов орбиты в формате TLE за период 5 лет полета. Результаты такого анализа приведены на рис. 1. Трасса подспутниковой точки представлена на рис. 2.

Пилообразный характер изменения эксцентриситета, а также пикообразные изменения большой полуоси орбиты демонстрируют процесс коррекции орбиты, который обеспечивает постоянство трассы подспутниковой точки. По результатам анализа можно сделать вывод, что коррекция параметров орбиты производится примерно один раз в пять месяцев.

Для спутника Sirius-2 (объект 26483 NORAD) эволюция элементов орбиты и трассы подспутниковой точки имеют аналогичный характер.

Чтобы построить аналогичную орбитальную группировку, оптимизированную для территории РФ, необходимо произвести модификацию начальных условий, что обеспечит расположение географической долготы оси симметрии трассы на поверхности Земли около 95 град. в.д. (оптимальное положение по критерию максимума видимости территории России) и проверить устойчивость параметров орбиты.

Модификация орбитальных параметров для территории России

В работе [11] рассматривалась подобная модификация. Однако приведенные там начальные условия требуют уточнения, для того чтобы обеспечить долговременную стабильность орбитальной группировки. Такой же вывод можно сделать и относительно элементов орбиты, приведенных в [8].

Принимая во внимание результаты, полученные при анализе стабильности орбиты спутников Sirius-1/2/3, и учитывая то, что изменение большой полуоси орбиты и географической дол-

готы оси симметрии трасс подспутниковых точек в основном связано с резонансными возмущениями от секториальных гармоник разложения гравитационного поля Земли порядка 2 и степени 2 (C22, S22), а также то, что изменения эксцентриситета, аргумента перигея, угла наклонения и восходящего узла орбиты обусловлены возмущениями от Луны и Солнца, в качестве первого варианта рассматривалась группа начальных условий табл. 1 и 2, обеспечивающая положение оси симметрии трассы подспутниковых точек на долготе около 95 град. в.д.

Гринвичская долгота восходящего узла для КА 101, 201 и 301 равна 127,57 град. Результат расчета движения трасс подспутниковых точек для начала модельного интервала приведен на рис. 3.

Географическая долгота оси симметрии трассы на поверхности Земли около 95 град. в.д. Для момента прохождения апогея и зоны видимости КА с Земли под углом 10 град. абонент может иметь неподвижную антенну с шириной диаграммы направленности более 13,5 град. При этом наклонная дальность до границы зоны 52 070,8 км. Высота полета КА в этот момент 47 175 км.

Для проверки долговременной стабильности орбитальной группировки использовалась численная методика прогнозирования движения КА, учитывающая несферичность гравитационного потенциала Земли и возмущения, обусловленные притяжением Луны и Солнца. Особенности численного метода изложены в работе [12] и позволяют проводить прогноз движения КА на длительные интервалы времени с высокой точностью.

В результате получено, что изменение большой полуоси орбиты и географической долготы в основном связано с резонансными возмущениями от секториальных гармоник разложения гравитационного поля Земли порядка 2 и степени 2 – C22, S22. Изменения эксцентриситета, аргумента перигея, угла наклонения и восходящего узла орбиты обусловлены возмущениями от Луны и Солнца, и их изменение во времени приведено на рис. 4, 5 и 6 (географическая долгота относительно гринвичского меридиана в момент пересечения восходящего узла орбиты) для интервала 4 года.

Как следует из этих результатов моделирования, на интервале времени порядка года отличия мгновенных значений элементов орбиты от номинальных уже становятся существен-

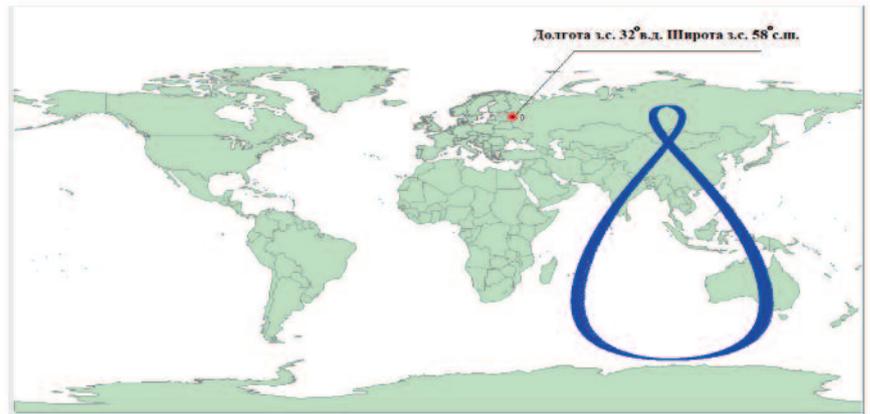


Рис. 5. Взаимное наложение трасс подспутниковых точек трех КА для интервала времени 7 мес.

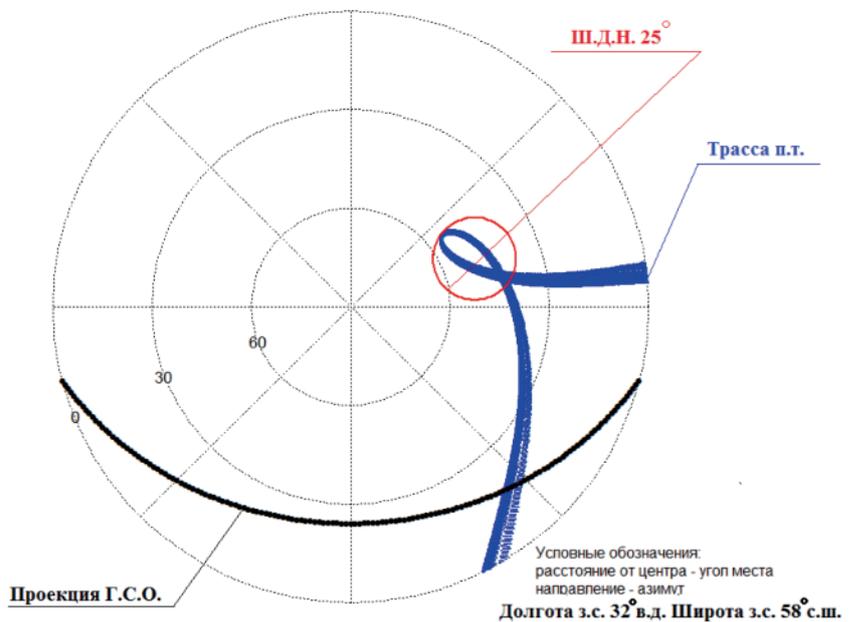


Рис. 6. Проекция трасс движения КА (рис. 9) для системы координат ЗС

Таблица 3. Оптимизированные для территории РФ начальные условия орбитальной группировки типа "Тундра", содержащей три КА

Оскулирующие кеплеровские элементы для начала витка	КА 101	КА 201	КА 203
Дата и время	3 января 2012 г. 16:14:45	4 января 2012 г. 00:13:15	4 января 2012 г. 08:11:45
Большая полуось, км	42 164,9	42 164,6	42 163,8
Эксцентриситет	0,348	0,348	0,348
Наклонение, град.	68,3	68,3	68,3
Долгота восходящего узла, град.	136,1	136,1	136,1
Аргумент перигея, град.	270	270	270
Аргумент широты, град.	0	0	0

ными. Для поддержания системы в рабочем состоянии необходимо выполнять регулярную коррекцию параметров орбиты примерно один раз в 6 месяцев.

Для периода времени 7 месяцев на рис. 5 показана картина наложения трасс подспутниковых точек, дающая

представление о степени пространственной нестабильности на таком интервале времени.

Результаты расчетов показывают, что более стабильную орбитальную группировку можно было бы получить, если бы ось симметрии трасс подспутниковых точек находилась в области

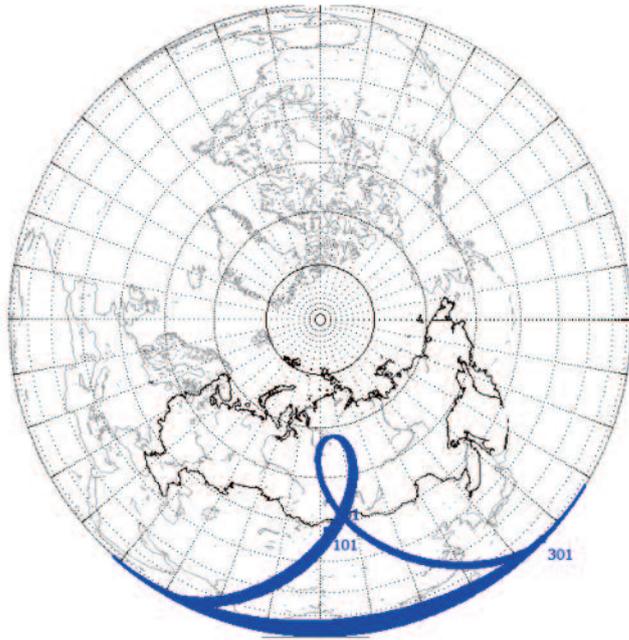


Рис. 7. Взаимное наложение трасс подспутниковых точек трех КА для интервала времени 7 мес. (табл. 3)

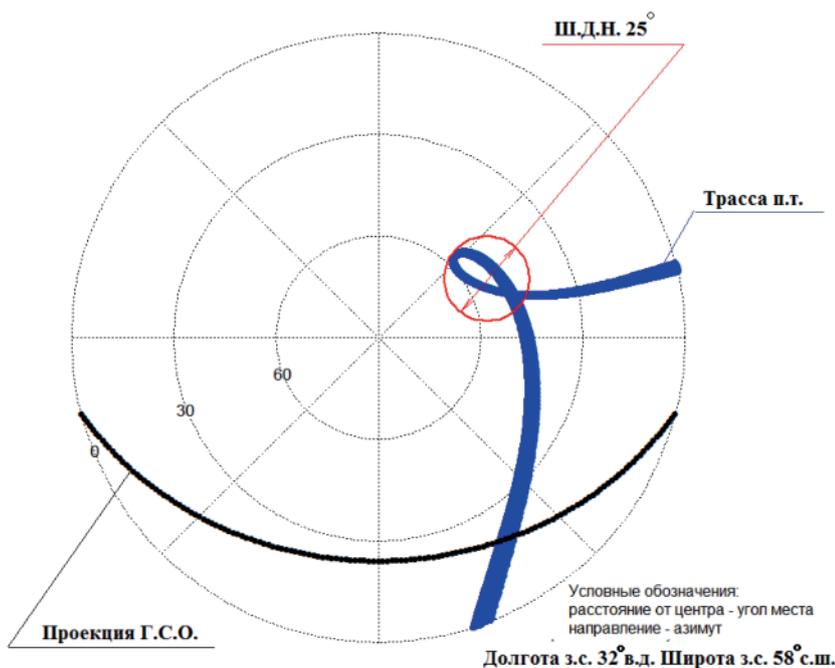


Рис. 8. Проекция трасс движения КА для системы координат ЗС "угол места/азимут" для интервала времени 7 мес. (табл. 3, рис. 11)

Таблица 4. Оптимизированные для территории РФ начальные условия орбитальной группировки типа "Тундра", содержащей четыре КА

Оскулирующие кеплеровские элементы для начала витка	КА 101	КА 201	КА 301	КА 401
Дата и время	3 января 2012 г. 14:15:07	3 января 2012 г. 20:14:00	4 января 2012 г. 02:12:52	4 января 2012 г. 08:11:45
Большая полуось, км	42 164,74	42 164,74	42 164,27	42 163,8
Эксцентриситет	0,345	0,345	0,345	0,345
Наклонение, град.	63,24	63,24	63,24	63,24
Долгота восходящего узла, град.	136,06	136,06	136,06	136,06
Аргумент перигея, град.	270	270	270	270
Аргумент широты, град.	0	0	0	0

75 град. в.д. При таком расположении в меньшей степени сказывается резонансное влияние возмущений от секториальных гармоник разложения гравитационного поля Земли порядка 2 и степени 2 – С22, S22. Однако такое расположение оси симметрии трассы подспутниковых точек сместит гарантированную зону обслуживания системы в сторону стран Центральной Европы.

Чтобы получить представление о влиянии этой нестабильности на условия работы земных станций, был рассмотрен вариант наблюдения за космическими аппаратами земной станции (ЗС), расположенной в точке с координатами 32 град. в.д. и 58 град. с.ш. Расположение ЗС выбрано исходя из требования нахождения ее вблизи края гарантированной рабочей зоны обслуживания. Для оценки влияния нестабильности орбитальной группировки была построена проекция трасс КА (рис. 8) в системе координат "угол места/азимут ЗС" для интервала времени 7 мес. Черная кривая на рис. 6 показывает проекцию геостационарной орбиты в систему координат ЗС. Красным контуром показана ориентация главного лепестка диаграммы направленности антенны ЗС, имеющей ширину 25 град. Таким образом, можно считать, что в случае земной станции с неподвижно ориентированной антенной с диаграммой направленности 25 град. для КА, летящих без коррекции в течение семи месяцев, рабочий участок траектории будет в пределах ее ширины диаграммы направленности. При этом усиление такой антенны составит не менее 16 дБ.

Оптимизация орбитальной группировки для территории России

Оптимизация орбитальной группировки для территории РФ заключается в изменении орбитальных параметров таким образом, чтобы рабочая часть траектории КА (в районе петли трасс подспутниковых точек) находилась целиком над территорией РФ. Такое решение позволит увеличить углы места видимости КА для абонентов системы, расположенных в гарантированной рабочей зоне. Для измененной орбитальной группировки предлагается использовать значение эксцентриситета орбиты примерно 0,348 вместо 0,27 и значение наклонения 68,3 град. вместо традиционного значения 63,4 град. Полная группа начальных условий для расчета движения КА в орбитальной группировке приводится в

табл. 3. Расчет движения КА показывает, что для приведенных в табл. 3 начальных условий движение КА надежно сохраняется в течение шести месяцев. Этот результат иллюстрируют рис. 7, 8, на которых показано взаимное наложение трасс подспутниковых точек для полярной картографической проекции и для диаграммы "угол места/азимут" для земной станции, расположенной в точке с координатами 32 град. в.д. и 58 град. с.ш.

Из рис. 6 и 8 следует, что в случае использования земных станций с фиксированно ориентированной антенной необходимо, чтобы ширина диаграммы направленности составляла величину более 25 град.

Для уменьшения ширины диаграммы направленности необходимо изменить орбитальную группировку так, чтобы существенным образом уменьшились размеры рабочей части трассы подспутниковых точек, которая представляет собой петлю. Эта задача решается путем увеличения числа КА до четырех. Соответствующие орбитальные параметры КА, входящих в состав такой орбитальной группировки (рис. 9), представлены в табл. 4.

Соответствующие начальные условия всех четырех КА приведены в табл. 4, а на рис. 10 показана проекция их трасс движения в системе координат земной станции (угол места/азимут) для интервала времени моделирования 7 мес. При использовании на земной станции фиксированно ориентированной антенны с шириной диаграммы направленности 12,5 град. рабочая часть траектории движения КА будет целиком находиться в ее пределах в течение всего времени моделирования. Таким образом, усиление антенны будет не менее 22 дБ, что на 6 дБ выше, чем для случая группировки из трех КА.

В табл. 5 представлены параметры движения четырех КА, образующих группировку на орбите типа "Тундра" с интервалом 3 мес. Средние значения элементов орбит объектов даны на разные даты. Интервал между датами составляет 3 месяца для 9 месяцев движения КА без коррекции.

Угол наклона i и долгота восходящего узла Ω измеряются в градусах и даны в системе истинного экватора даты. Эксцентриситет орбиты e – величина безразмерная. Аргумент перигея орбиты ω измеряется в градусах. Среднее движение n измеряется в оборотах за сутки. Символом L обозначена географическая долгота точки в момент пересечения спутником вос-



Рис. 9. Номинальная форма трасс подспутниковых точек для ОГ, состоящей из четырех КА (табл. 4)

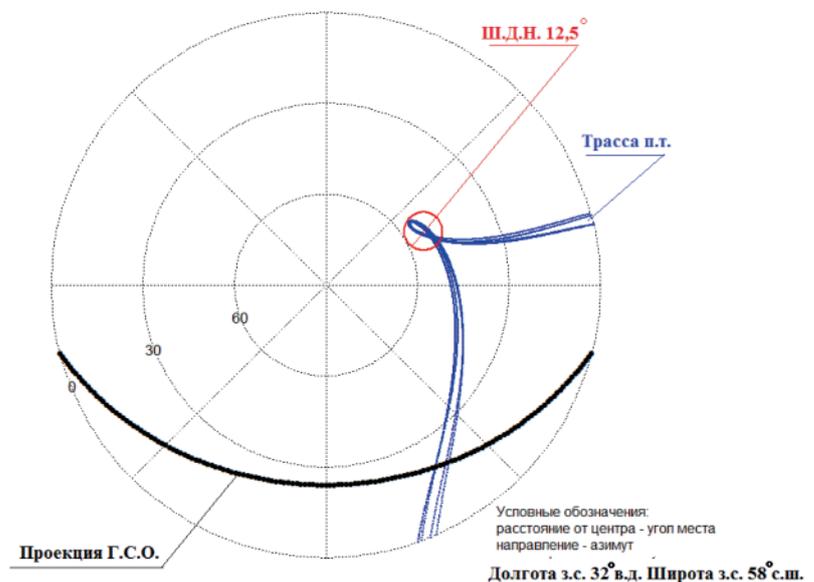


Рис. 10. Проекция трасс движения КА для системы координат ЗС "угол места/азимут" для интервала времени 7 мес. для ОГ из четырех КА (табл. 4)

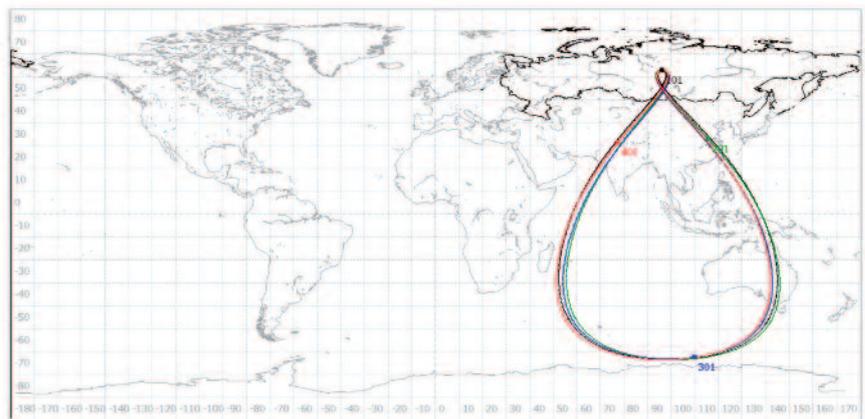


Рис. 11. Взаимное наложение трасс подспутниковых точек четырех КА для интервала времени 7 мес. (табл. 4)

ходящего узла орбиты на экваторе Земли, единица измерения – градусы.

На рис. 11 показано взаимное наложение трасс подспутниковых точек для начала и конца интервала времени

моделирования 7 мес. Из данных табл. 5 следует, что за девять месяцев – с 1 октября 2011 г. до 1 июля 2012 г. – параметры всей системы хорошо удерживаются. Ось симметрии орбиталь-

Таблица 5. Параметры орбит спутников

а) 01.10.2011				
Параметр	КА 101	КА 201	КА 301	КА 401
i, град.	63,0797	63,3409	63,2628	63,2690
Ω , град.	93,4197	183,2250	273,5571	3,6425
e	0,3404654	0,3467621	0,3522766	0,3418009
ω , град.	271,0373	271,5870	270,4125	269,9779
n	1,00282047	1,00282052	1,00284750	1,00284953
L, град.	132,885	132,909	134,519	133,901
б) 01.01.2012				
Параметр	КА 101	КА 201	КА 301	КА 401
i, град.	63,2336	63,2418	63,2358	63,2403
Ω , град.	92,4832	182,4436	272,4300	2,3946
e	0,3451061	0,3451598	0,3453778	0,3449810
ω , град.	270,0113	270,0299	270,0013	270,0032
n	1,00278188	1,00276904	1,00279411	1,00277974
L, град.	136,019	136,014	136,044	136,011
в) 01.04.2012				
Параметр	КА 101	КА 201	КА 301	КА 401
i, град.	63,2237	63,3316	63,0661	63,3256
Ω , град.	91,3983	181,6686	271,3551	1,2056
e	0,3514440	0,3443436	0,3416529	0,3433570
ω , град.	269,4105	268,4574	269,3202	269,7753
n	1,00272776	1,00271762	1,00272043	1,00273543
L, град.	137,331	137,233	136,427	135,871
г) 01.07.2012				
Параметр	КА 101	КА 201	КА 301	КА 401
i, град.	63,3777	63,2224	63,0505	63,2865
Ω , град.	90,4423	180,8816	270,2544	359,9696
e	0,3557066	0,3440370	0,3356805	0,3462669
ω , град.	268,4274	266,9390	268,8500	269,6839
n	1,00265738	1,00267708	1,00265531	1,00272040
L, град.	137,060	136,852	134,389	134,330

Таблица 6. Ситуации сближения спутников

Период	Объекты	Расстояние, км
01.10.2011		
02 ч 15 мин.	КА 401 – КА 101	1100
08 ч 10 мин.	КА 101 – КА 201	1300
14 ч 10 мин.	КА 201 – КА 301	2700
20 ч 10 мин.	КА 301 – КА 401	2900
01.01.2012		
02 ч 00 мин.	КА 101 – КА 201	1700
08 ч 00 мин.	КА 201 – КА 301	2500
14 ч 00 мин.	КА 301 – КА 401	2100
20 ч 00 мин.	КА 401 – КА 101	2800
01.04.2012		
01 ч 59 мин.	КА 201 – КА 301	1800
07 ч 54 мин.	КА 301 – КА 401	1100
13 ч 54 мин.	КА 401 – КА 101	4200
19 ч 54 мин.	КА 101 – КА 201	1700
01.07.2012		
01 ч 58 мин.	КА 301 – КА 401	1600
07 ч 58 мин.	КА 401 – КА 101	8100
14 ч 02 мин.	КА 101 – КА 201	3100
20 ч 01 мин.	КА 201 – КА 301	1000

ной группировки претерпевает небольшое смещение в октябре на три градуса к гринвичскому меридиану.

В табл. 6 представлены результаты расчетов ситуаций сближения объ-

ектов на четыре даты с начальными условиями из предыдущих таблиц. В таблицах даны моменты наибольшего сближения пары объектов на указанную дату и расстояния между этими

спутниками на момент наибольшего сближения в километрах.

На дату 1 октября 2012 г. географические долгота λ и широта ϕ точки наибольшего сближения были следующими: $\lambda = 95$ град. 30 мин., $\phi = 54$ град. 30 мин., на дату 1 января 2012 г. – $\lambda = 98$ град. 45 мин., $\phi = 55$ град. 30 мин., на дату 1 апреля 2012 г. – $\lambda = 98$ град. 00 мин., $\phi = 55$ град. 00 мин., на дату 1 июля 2012 г. – $\lambda = 96$ град. 20 мин., $\phi = 54$ град. 30 мин.

Таким образом, минимальное расстояние между спутниками в момент начала/окончания рабочего интервала траектории находится в пределах от 1000 до 3000 км в течение 6 мес. и не превышает 8000 км в течение 9 мес. При этом рабочая область траектории движения все еще будет находиться в области главного лепестка ДН абонентской антенны, а заметно больше других отклонилось от заданных параметров одно сочетание КА (табл. 6, наихудшее значение 1000 км).

Выводы

- Анализ группировки спутников Sirius показал, что корректировка орбиты "Тундра" осуществляется с интервалом времени один раз в 5 мес.
- Параметры орбитальной группировки типа "Тундра" могут быть успешно модифицированы и оптимизированы для создания системы, обслуживающей РФ. Все рассмотренные модификации достаточно стабильны. Корректировка КА требуется с периодичностью один раз в 5–6 мес. на интервале времени 15 лет.
- При использовании антенн земных станций с фиксированной ориентацией в пространстве при работе с орбитальной группировкой из трех КА целесообразно обеспечивать ширину главного лепестка диаграммы направленности 25 град. (уровень – 3 дБ). В этом случае на интервале времени 7 мес. некорректируемого полета КА рабочая часть траектории не выходит за пределы ширины диаграммы направленности. В случае реализации системы из четырех КА требуемая ширина диаграммы направленности может быть уменьшена в два раза, то есть до 12,5 град., что на 6 дБ улучшает энергетику абонентской радиолинии (усиление антенны составит не менее 22 дБ).
- На интервале времени 9 мес. уход КА в точке сближения приближается к критической величине, однако рабочая область траектории движения все еще будет находиться в области главного лепестка диаграммы

направленности абонентских антенн. При этом наиболее неблагоприятной областью размещения земных станций будет область на поверхности Земли, лежащая непосредственно в центре рабочей петли трассы движения подспутниковых точек.

* Полученные результаты позволяют оптимистически оценить перспективы использования орбит типа "Тундра" для создания коммерческой системы фиксированной связи, обслуживания абонентов выше 35 град. с.ш. при использовании земных станций с фиксированным положением антенн в пространстве. ■

Литература

1. Анпилогов В.Р. О проблемах спутниковой связи и вещания в Арктике // Технологии и средства связи. Спутниковая связь и вещание. – 2014. – № 6-2. – С. 24–31. – Обсуждение на заочном круглом столе.
2. Шалагинов А. Проекты многофункциональных спутниковых систем для Арктических регионов России // Технологии и средства связи. Спутниковая связь и вещание. – 2014. – № 6-2. – С. 16–17.
3. Акимов А., Полищук В., Шевчук Д. Моделирование рабочей зоны спутниковой группировки, сформированной на орбите "Тундра" // Технологии и средства связи. Спутниковая связь и вещание. – 2014. – № 6-2. – С. 44–49.
4. Drain J.E. Three and four-satellite continuous-coverage constellations // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. – Vol. 8, № 6 (1985), P. 725–730. – doi: 10.2514/3.20047.
5. Пат. 4.943.808 US. Communications system with mowing bodies with the aid of satellites; опубл. 24.07.1990.
6. Рекомендация МСЭ-R S.1758. Характеристики систем фиксированной спутниковой службы типа НЕО.
7. Holzbock H., Battaglia L., Werner M. Cost and performance of heo and geo european satellite radio systems. – 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. – AIAA 2003-2349.
8. Angeletti P., Guida U., Lisi M., Lucchi G. Heo satellite systems for broadband aeronautical communications. – 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. – AIAA 2003-2347.
9. Локшин Б. Об одной возможности организации подвижной связи с ВЭО в КУ диапазоне // Технологии и средства связи. Спутниковая связь и вещание. – 2014. – № 6-2. – С. 18–20.
10. Hoots F.R., R hrich R.R. SPACETRACK report № 3, 1980 [online]. Доступ через <http://celestrelxak.com/NORAD/documentation>.
11. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой / Е.Ф. Камнев, А.И. Аболиц, А.А. Акимов и др. – М.: Глобсатком, 2009. – 723 с.
12. Аксенов Е.П., Чазов В.В. Модель движения ИСЗ. Главная проблема. Основные алгоритмы. – М.: ГАИШ МГУ, 2011. – 188 с.