

УДК 629.78

Канал связи малоразмерного космического аппарата на базе спутниковой связной системы ГЛОБАЛСТАР

И. А. Морозов, Н. С. Данилин¹, Н. Н. Макухин, А. С. Сергеев

¹д. т. н., проф., АО «Российские космические системы»

e-mail: morozov_ia@spacecorp.ru

Аннотация. Использование существующих глобальных спутниковых связных систем (ССС) общего назначения для управления малоразмерными космическими аппаратами (МКА) в настоящее время является перспективным и малозатратным направлением. Наиболее подходящей для выполнения задачи является система ГЛОБАЛСТАР. Впервые канал связи с использованием этой системы был реализован на наноспутнике ТНС-0 № 1 в 2005 г.

В статье приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных данных, полученных с ТНС-0 № 1 и компьютерного моделирования условий полета на программном комплексе «ЗРВ ТНС-0». Определены условия благоприятной связи, при которых технология управления МКА с использованием сети ГЛОБАЛСТАР является весьма эффективной, малозатратной и эксплуатационно-удобной и реализуема как в стационарном, так и в мобильном вариантах. Установлено, что область пространства, где связь возможна, представляет собой т. н. «конус связи», в котором должны одновременно находиться МКА, КА ГЛОБАЛСТАР и наземная станция сопряжения.

Указаны конкретные причины отсутствия связи, даны практические рекомендации по повышению количества и продолжительности сеансов связи. Предложен новый способ организации канала связи с использованием СССР ГЛОБАЛСТАР, приведены результаты наземных испытаний.

Ключевые слова: наноспутник, малоразмерный космический аппарат, ГЛОБАЛСТАР, спутниковая связная система, зона радиовидимости

Communication Canal of Small-Size Spacecraft on the Base of Space Communication System GLOBALSTAR

I. A. Morozov, N. S. Danilin¹, N. N. Makukhin, A. S. Sergeev

¹doctor of engineering science, professor, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: morozov_ia@spacecorp.ru

Abstract. Usage of the present global satellite communication systems of the general purpose for control of small-size spacecraft is considered to be a perspective and low-cost direction. The most suitable system to fulfill this task is the GLOBALSTAR system. For the first time a communication channel with this system was implemented on the nanosatellite TNS-0 № 1 in 2005.

The article shows the results of the comparative analysis of the experimental data received from TNS-0 № 1 and a computer modeling of the mission conditions on the software package "Radio coverage zone of TNS-0". Favourable communication conditions in which a technology for small-size spacecraft control with use of the GLOBALSTAR system is very effective, low-cost and operationally convenient, as well as realized both in stationary and mobile variants, are defined. It is determined that the area of space where communication can be possible is a so called "cone of communication" in which a small-size spacecraft, GLOBALSTAR spacecraft and ground gateways should be at one time.

The article describes specific causes of lack of communication. Practical recommendations on increasing the amount and duration of communication sessions are given. A new way for communication channel organization using GLOBALSTAR satellite communication systems is proposed. The results of the ground tests are presented.

Keywords: nanosatellite, small-size spacecraft, GLOBALSTAR, space communication system, zone of radio visibility

Использование спутниковых систем связи (ССС) коммерческого назначения для управления малоразмерными космическими аппаратами (МКА) в настоящее время является перспективным и малозатратным направлением.

Среди существующих СССР (Инмарсат, Иридиум, Орбкомм, Турайя, ГЛОБАЛСТАР) наиболее подходящей для выполнения задачи является система ГЛОБАЛСТАР.

Большая высота орбиты спутников ($H = 1400$ км) позволяет получить обширные зоны обслуживания МКА. Вес абонентского оборудования (спутниковый модем и антенна) не превышает нескольких сот грамм, что позволяет использовать его на МКА. Система сертифицирована в России.

Впервые канал связи с использованием СССР ГЛОБАЛСТАР был реализован на наноспутнике ТНС-0 № 1 (рис. 1). Это один из первых российских наноспутников. Он изготовлен в ОАО РКС и 28 марта 2005 г. был запущен «ручным способом» с борта МКС. Активная работа со спутником происходила до 6 июля 2005 г., когда был полностью израсходован энергоресурс бортовой батареи.



Рис. 1

Одной из основных целей запуска наноспутника ТНС-0 № 1 была проверка возможности проведения сеансов связи между спутником и наземным ЦУП с использованием СССР ГЛОБАЛСТАР,

а также мониторинг сети для определения возможности управления МКА через систему.

Схема информационного обмена между МКА и ЦУП с использованием системы ГЛОБАЛСТАР приведена на рис. 2.

Для успешного проведения сеансов связи с ЦУП МКА и наземная станция сопряжения (СС) должны одновременно находиться в зоне радиовидимости (ЗРВ) КА ГЛОБАЛСТАР (КА ГС). Пространство, где связь возможна, представляет собой «конус связи» с параметрами:

- вершина находится в центре масс КА ГС;
- угол полураствора α_{\max} определяется диаграммой направленности антенны КА ГС.

На рис. 3 показана схема совместной зоны радиовидимости МКА–КА ГС–СС.

Конструкция наноспутника ТНС-0 № 1 показана на рис. 4.

Связь и управление ТНС-0 № 1 осуществлялись через модем GSP 1620 системы ГЛОБАЛСТАР (рис. 5). Включение модема происходило автоматически на 10 мин каждый час полета. При наличии канала связи происходил обмен информацией с наземным ЦУП.

По окончании ЛКИ проведен анализ полученных результатов. В ходе анализа были использованы следующие данные:

- **данные ЦУП по проведенным сеансам связи;**

- **каталожные номера активных спутников в орбитальной группировке ГЛОБАЛСТАР.** Данные были получены экспериментальным путем. Установлено, что во время проведения ЛКИ ТНС-0 № 1 из штатных 48 КА ГС активными были только 36, что, несомненно, отразилось на количестве успешно проведенных сеансов связи;

- **данные системы ГЛОБАЛСТАР о регистрациях ТНС-0 № 1 в сети.** Мониторинг регистраций проводился провайдером ГЛОБАЛСТАР в России ЗАО «Глобалтел» в соответствии с достигнутым ранее соглашением;

- **орбитальные данные (TLE) системы контроля космического пространства NORAD на МКА и активные КА ГС.** Архивы данных находятся в открытом доступе на сайте <https://www.space-track.org>;

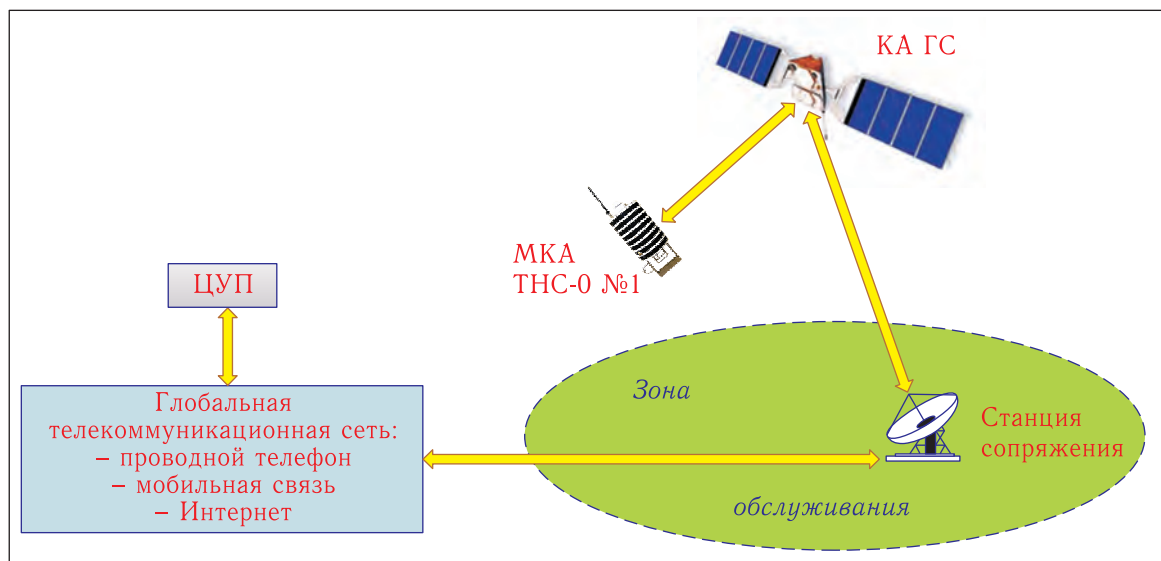


Рис. 2. Схема информационного обмена между МКА и ЦУП

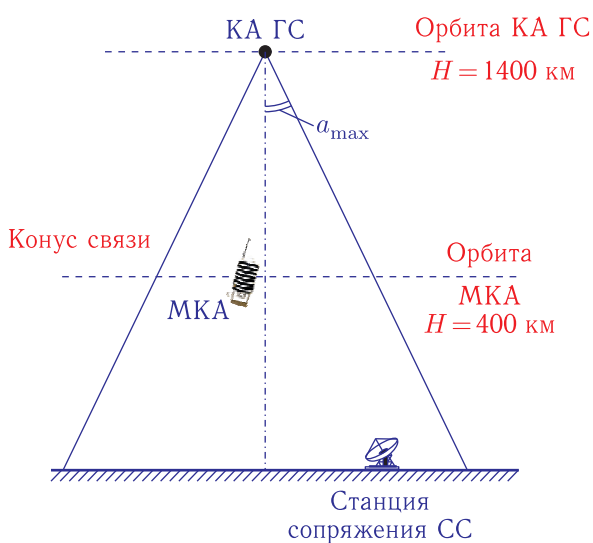


Рис. 3. Схема совместной ЗРВ МКА-КА ГС-СС



Рис. 4. Внешний вид наноспутника без кожуха

– **координаты наземных станций сопряжения и их зоны обслуживания.** Данные получены из технического описания на ССС ГЛОБАЛСТАР.

Компьютерное моделирование условий полета ТНС-0 №1 проводилось с использованием программного комплекса «ЗРВ ТНС-0» (рис. 6).

Результаты расчета сеансов связи приведены на рис. 7.

Результаты послеполетного анализа данных ЛКИ ТНС-0 №1

1. Летно-конструкторские испытания (ЛКИ) наноспутника ТНС-0 №1 прошли успешно. Активная работа спутника продолжалась 68 сут 20 ч

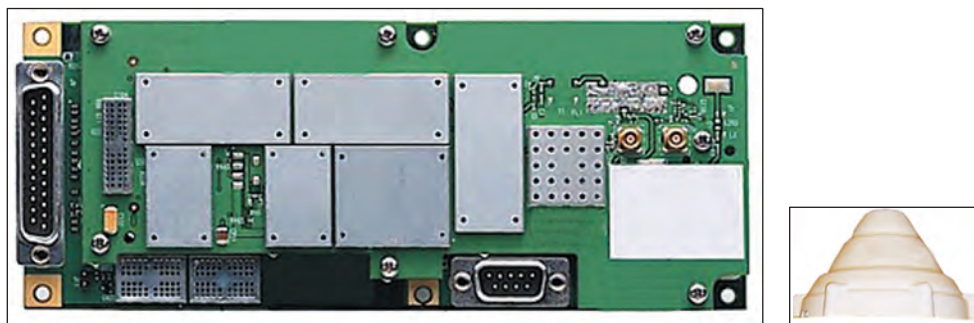


Рис. 5. Модем GSP 1620 с антенной Qualcomm

Выбор расчетного состава МКА

№ п/п	№ МКА	TLE-1
1	TNS-Q_04	1 29547U 05007C 05087 98742701 00058824 00000-0 44893-3
2	TNS-Q_01	1 29547U 05010A 05087 75568373 00017889 00000-0 14870-3

Выбор расчетного состава спутников связи

Игол обзора, градусы: 54.5

Шаг, градусы: 0.5

Ограничения: Полная дальность, км: 0.0; Парад скорости, км/с: 0.0

Таблица исходных данных для спутников связи

№ п/п	№ GLOBALSTAR	TLE-1
42	M259	1 29444U 99050B 09138 15595208 -00000006 00000-0
43	M256	1 29444U 99050C 09138 01481455 -00000006 00000-0
44	M201	1 29444U 99050D 09138 73725663 -00000006 00000-0
45	M239	1 29461U 99063A 09138 11168297 -00000006 00000-0
46	M234	1 29463U 99062B 09137 51274189 -00000006 00000-0
47	M229	1 29463U 99062C 09137 87273837 -00000006 00000-0
48	M261	1 29464U 99062D 09137 88096699 -00000074 00000-0
49	M263	1 29381U 00000A 09138 60378136 -00000006 00000-0

Выбор расчетного состава шлюзовых станций

Москва

Аббревиатура: Ботукату, Берариру, Рориа-2002, Аляска, Джералдстон, Кузайру, Кабо-Рокко, Коралко, Корвова, Летбридж, Дюна, Дюс-Алеклес, Виллус, Марит-Айла, Монреаль, Новосибирск, Панама, Сеул, Сидней, Тулуза, Удине, Хабаровск, Эр-Рияд

Аббревиатура: Координаты: Широта, град: 55; Долгота, град: 34

Ограничения: Минимальный угол возмещения, град: 11

Таблица исходных данных для шлюзовых станций

№ п/п	Шлюзовая станция	Страна	Широта	Долгота
18	Манус	Бразилия	-2.3611	300.0000
19	Жуазейру	Бразилия	-9.5833	319.5710
20	Ботукату	Бразилия	-22.9333	381.4710
21	Коралко	Аргентина	-31.3889	295.8000
22	Джералдстон	Австралия	-26.8194	114.6830
23	Марит-Айла	Австралия	-20.9722	139.4030
24	Сидней	Австралия	-33.9667	151.0520
25	Москва	Россия	55.7575	37.6300

Параметры расчета

Прогноз: ☒ По спутнику, ☐ Выборочно по времени

Дата начала расчета: 18.05.2009

Интервал расчета (сутки): 1

Интервал расчета (время): Начало: 00:00, Конец: 00:00

Шаг расчета (сек): 20

Шаг выдачи результатов (сек):

ΔT < 120 с: 2

120 с < ΔT < 300 с: 5

300 с < ΔT < 600 с: 10

600 с < ΔT < 900 с: 15

900 с < ΔT < 1200 с: 20

1200 с < ΔT < 1800 с: 30

1800 с < ΔT < 3600 с: 50

ΔT > 3600 с: 60

Установка времени: ☐ Заданное время (UTC + 3h), ☒ Летнее время (UTC + 4h)

☒ Решение [МКА-КА]

☒ Решение [КА-ВС]

☒ Общое ЗРВ [МКА-КА-ВС]

КА

Рис. 6. Центральное окно программного комплекса «ЗРВ ТНС-0»

31 мин (с 09:39 МДВ 28.03.2005 г. по 06:10 МДВ 05.06.2005 г.). За это время ТНС-0 №1 совершил 1086 витков. Проведено 22 сеанса связи, из них 11 сеансов — с ЦУП-1 (стационарный, система связи «ГЛОБАЛСТАР») и 12 сеансов — с ЦУП-2 (мобильный, система связи «МТС»). В сеансе №8 связь устанавливалась поочередно с ЦУП-1 и ЦУП-2. Суммарная продолжительность сеансов связи составила 38 мин 49 с. Средствами ЦУП ТНС-0 принято 561 397 байт (8731 кадров), передано 70 280 байт (8770 кадров) информации.

В ходе испытаний были получены витковые данные замера уровня сигнала (RSSI).

2. Определены условия благоприятной связи, при которых технология управления МКА с использованием сети ГЛОБАЛСТАР является весьма эффективной, малозатратной и эксплуатационно-удобной и реализуема как в стационарном, так и в мобильном вариантах. Вместе с тем определены и условия, связанные с неустойчивой ориентацией и стабилизацией КА, несовпадением текущего местоположения КА и зон обслуживания

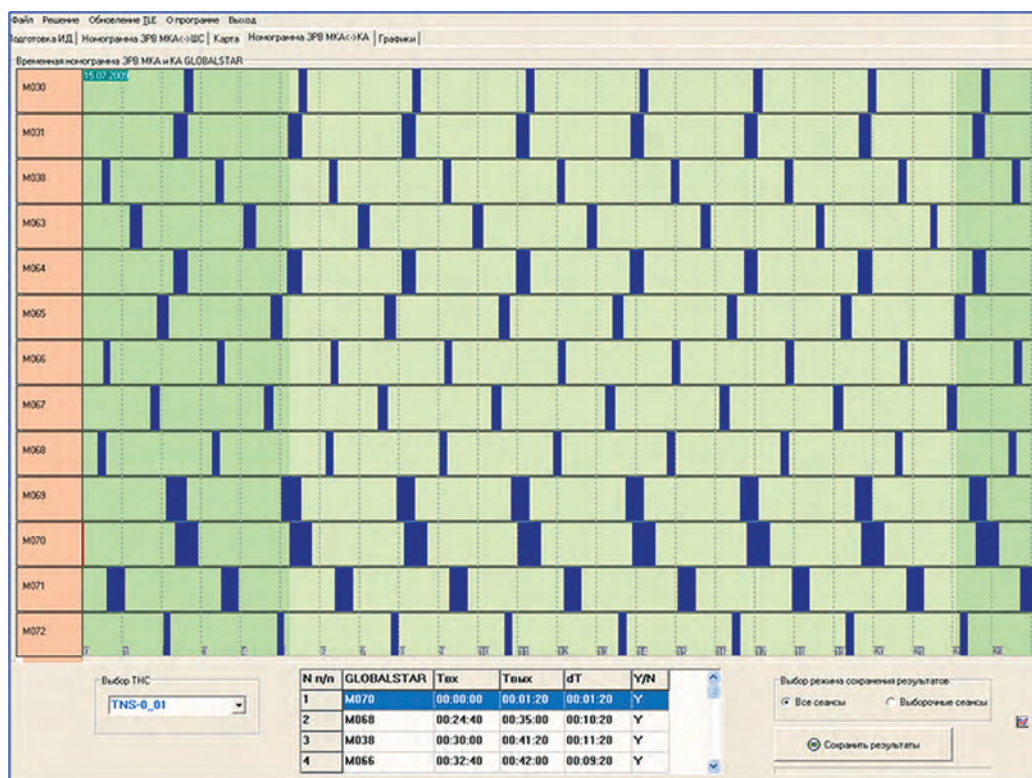


Рис. 7. Результаты расчета сеансов связи с использованием программного комплекса «ЗРВ ТНС-0»

системой ГЛОБАЛСТАР, когда такая связь является ненадежной и ею не следует пользоваться.

Мониторинг условий связи через систему ГЛОБАЛСТАР показал, что:

- 50 % включений модема ГЛОБАЛСТАР проходили вне зон обслуживания региональных операторов;
- в 12 % включений отсутствовал роуминг;
- в 14 % связь между ТНС-0 № 1 и КА «ГЛОБАЛСТАР» была неустойчивой (срыв связи);
- в 24 % включений качество канала связи обеспечивало обмен информацией с ЦУП.

3. Проверка программы «ЗРВ ТНС-0» показала правильность выбора алгоритмов расчета сеансов радиосвязи ЦУП и МКА. Большинство полученных в ходе мониторинга сети ГЛОБАЛСТАР экспериментальных данных с достаточно высокой точностью совпадают с расчетом. Однако некоторые из полученных данных расчету не соответствуют. В частности, фиксируется наличие RSSI вне ЗРВ.

Возможно, этот эффект связан с переотражениями радиосигнала в атмосфере. Для более детального изучения причин несовпадения некоторых данных с расчетом работы необходимо продолжить, включая новый космический эксперимент с использованием наноспутника ТНС-0 № 2.

Проведенный космический эксперимент доказал возможность использования ССС ГЛОБАЛСТАР для управления МКА. Однако количество успешных сеансов связи с ЦУП (24 %) недостаточно. На последующих аппаратах необходимо предусмотреть меры для ее повышения.

Методы повышения количества и продолжительности сеансов связи МКА с ЦУП в сети ГЛОБАЛСТАР

1. Предварительный расчет сеансов связи.

Суть метода заключается в следующем. В ЦУП производится предварительный расчет совместных ЗРВ МКА, активных КА ГС и наземных

станций сопряжения. Такой расчет может быть выполнен с использованием программного комплекса «ЗРВ ТНС-0» на основе актуальных орбитальных данных (TLE) КА. Затем долгосрочное расписание включений (3–5 сут) передается на борт МКА.

Недостатки:

- ошибка расчета сеансов связи не превышает 30 с. Такую точность для формирования полетного задания МКА можно считать приемлемой при проведении сеансов связи в «широких» зонах обслуживания с временем пролета 5–10 мин. Однако для «узких» зон (≤ 3 мин) точность недостаточна;
- необходимость наличия регулярно обновляемых орбитальных данных, проведение расчета сеансов связи с последующей передачей данных на спутник.

2. Автономное включение модема ГЛОБАЛСТАР (Патент на изобретение № 2520352 от 23.08.2012 г.).

Указанных в п. 1 недостатков лишен метод автономного включения модема МКА по результатам анализа служебной информации, поступающей из сети ГЛОБАЛСТАР. Суть метода заключается в следующем.

В общем потоке информации, поступающей на борт МКА, кроме основной, имеется и служебная информация (СИ), предназначенная для обеспечения работоспособности системы ГЛОБАЛСТАР. С помощью специально разработанного ПО, установленного на борту спутника, происходит выделение сигналов СИ из общего потока информации. В результате последующей обработки СИ в логическом устройстве (ЛУ) по заранее выработанным алгоритмам происходит формирование команд на бортовую вычислительную машину (БВМ), которая управляет модемом ГЛОБАЛСТАР. Таким образом, время начала и продолжительность сеансов связи определяется бортовым ЛУ в автоматическом режиме и не зависит от команд из ЦУП. Расчета ЗРВ не требуется. Во время сеансов связи, кроме основной информации с МКА, в этом режиме в ЦУП передается и выделенная СИ сети ГЛОБАЛСТАР. Наличие СИ позволит повысить точность слепополетной обработки результатов ЛКИ МКА.

Наличие устойчивой связи в системе ГЛОБАЛСТАР определяется следующими сигналами СИ:

– RSSI. Это сигнал, характеризующий качество канала связи «Абонент–КА ГЛОБАЛСТАР–наземная станция сопряжения». Вырабатывается модемом на основе анализа приходящих сигналов от сети ГЛОБАЛСТАР. Амплитуда сигнала RSSI для обеспечения устойчивой связи должна быть не менее 3 единиц шкалы «Уровень сигнала»;

– сигнал «Регистрация». Поступает на модем после окончания процесса регистрации в сети ГЛОБАЛСТАР. Одновременно с сигналом «Регистрация» на модем приходит информация о номере СС, через которую осуществляется связь.

В пользовательском (однопортовом) режиме модема выделение сигналов СИ не предусмотрено. Для выделения сигналов СИ применена двухпортовая конфигурация модема.

Структурная схема работы модема ГЛОБАЛСТАР в автономном режиме показана на рис. 8.

Сигналы с «Порта управления» модема поступают на логическое устройство (ЛУ), состоящее из интегратора, ограничителя и логической схемы совпадения «И». Все устройства ЛУ реализованы на программном уровне.

Схема работает следующим образом. Во время полета МКА бортовой модем ГЛОБАЛСТАР работает в дежурном режиме с включенным приемником. В момент вхождения спутника в ЗРВ на «Порте управления» модема появляется сигнал RSSI. Далее RSSI поступает на интегратор. Как правило, начало (и окончание) сеанса связи характеризуется резкими изменениями уровня RSSI, что приводит к неустойчивой связи. Для устранения этого явления в схему автоматического управления работой модема включено интегрирующее звено. Амплитуда сигнала на выходе интегратора равна среднеарифметическому значению десяти текущих отсчетов уровня RSSI.

Затем ограничитель сравнивает текущее значение сигнала с заданным пороговым значением. В случае превышения порога на выходе ограничителя формируется уровень логической единицы, поступающей далее на один из входов схемы совпадения «И». При наличии регистрации спутника в сети с модема и на другой вход схемы совпадения поступает уровень логической единицы. В этом случае на выходе схемы совпадения «И» также

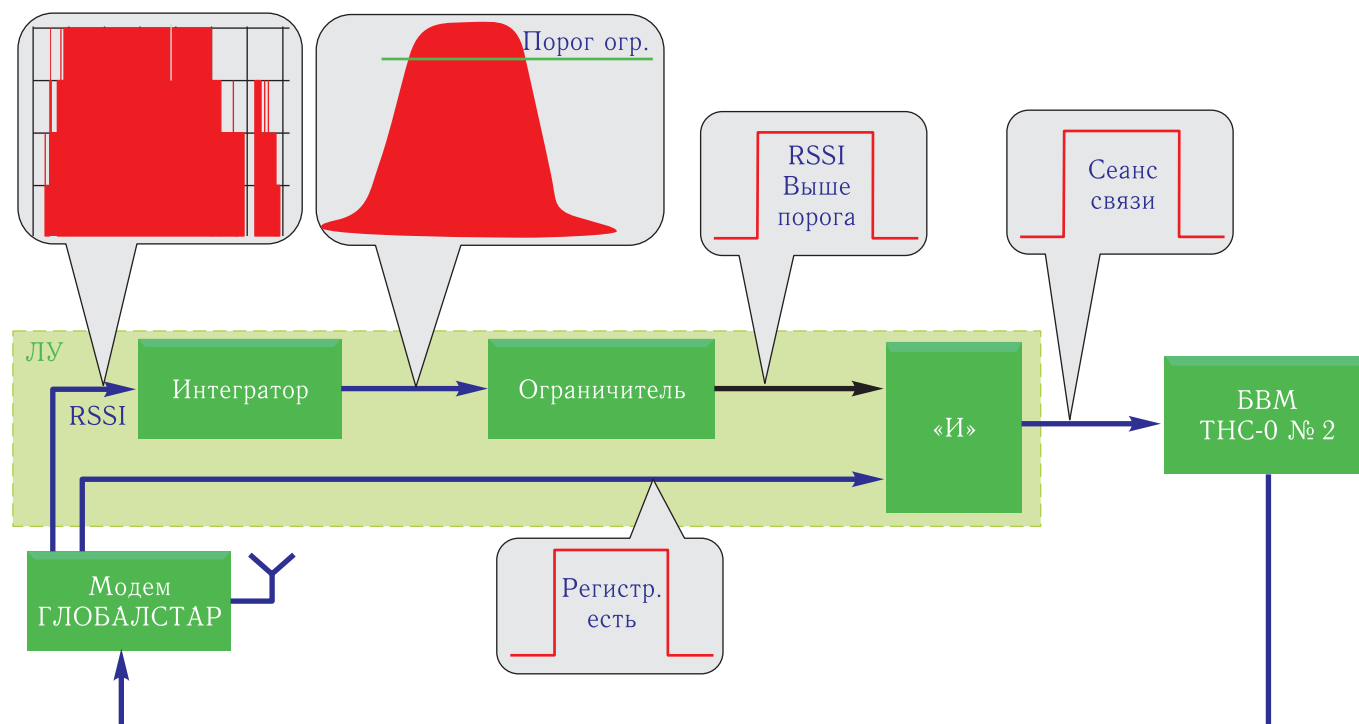


Рис. 8. Структурная схема автономного режима работы модема ГЛОБАЛСТАР

формируется уровень логической единицы. Затем положительное напряжение в виде команды поступает в БВМ для включения модема в рабочий режим. Происходит обмен информацией между МКА и наземным ЦУП.

При выходе из ЗРВ уровень RSSI падает до нуля. На выходе логической схемы «И» формируется уровень логического нуля. БВМ прекращает сеанс связи и переводит модем в дежурный режим.

Экспериментальная проверка работоспособности схемы автоматического режима модема в сети ГЛОБАЛСТАР–Интернет была проведена в наземных условиях на имитаторе ТНС-0 № 2. Внешний вид имитатора ТНС-0 № 2 показан на рис. 9.

В ходе эксперимента было проведено 11 сеансов связи с удаленным интернет-сервером средней продолжительностью 6 мин. Этого времени вполне достаточно для передачи тестового сообщения с имитатора ТНС-0 № 2 на интернет-сервер и получения ответного тестового сообщения (~1 мин).

Все тестовые сообщения были переданы и приняты полностью, без ошибок и потери информации. Средняя скорость обмена информацией составляет



Рис. 9. Имитатор ТНС-0 № 2

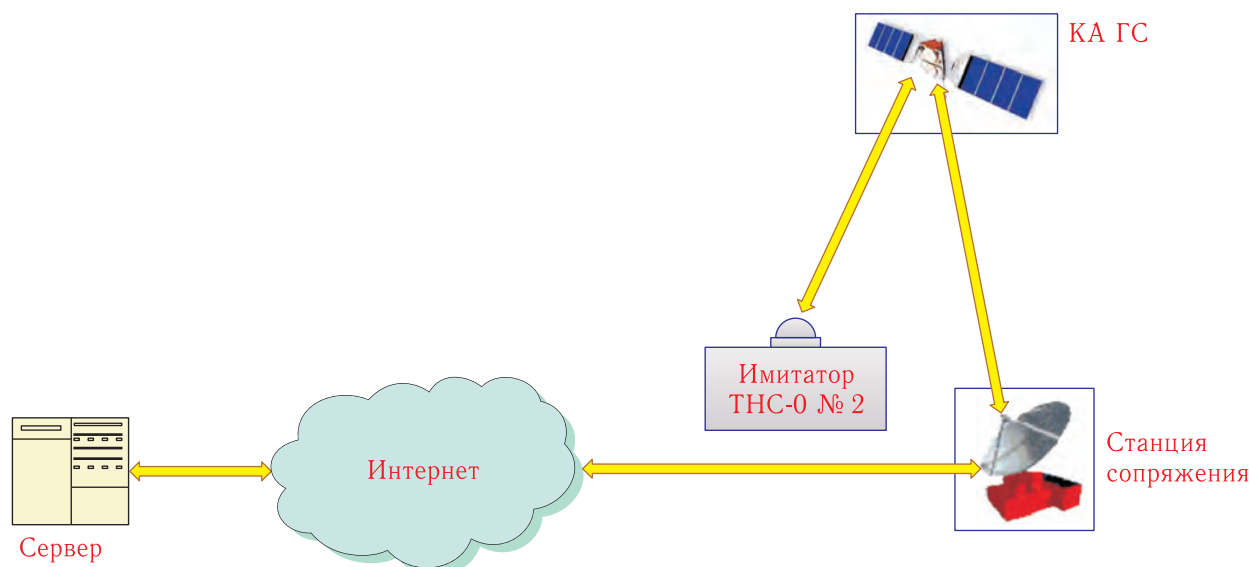


Рис. 10. Схема информационного обмена в сети ГЛОБАЛСТАР между имитатором ТНС-0 № 2 и интернет-сервером в пакетном режиме

7 кбит/с. Это значение весьма близко к максимально возможной скорости передачи информации в сети ГЛОБАЛСТАР, равной 7,2 кбит/с.

3. Использование пакетного режима передачи данных.

В сети ГЛОБАЛСТАР существуют два режима передачи данных: асинхронный, устанавливающий соединение с помощью наземных сетей ТФОП, GSM, и пакетный с использованием сети Интернет. Соединение с наземными сетями осуществляется с помощью различных серверов. Очевидно, что и время установления соединения в режимах будет различно. В ходе проведения наземного эксперимента на имитаторе ТНС-0 № 2 измерялось время установления соединения с абонентом. Среднее время установления соединения в асинхронном режиме составляет $T = 34$ с, а в пакетном режиме — $T = 5$ с. Значительное сокращение времени установления соединения (≈ 7 раз) позволяет повысить продолжительность сеансов связи. Особенно это важно для «узких» ЗРВ, длительностью менее трех минут.

Схема информационного обмена в сети ГЛОБАЛСТАР между имитатором ТНС-0 № 2 и интернет-сервером в пакетном режиме дана на рис. 10.

Из результатов проведенного эксперимента следует, что при последующих запусках МКА

целесообразно использовать пакетный режим. Дополнительное эксплуатационное преимущество режима: в случае отсутствия связи со стороны ЦУП

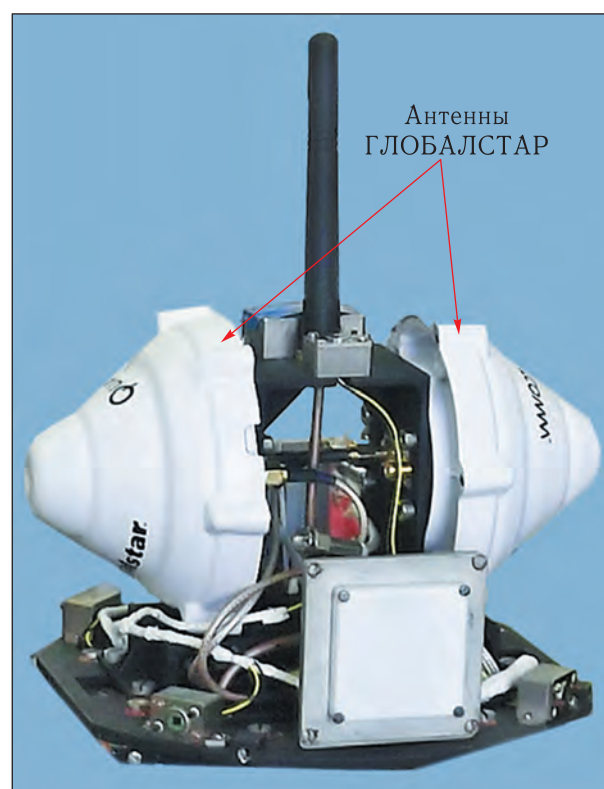


Рис. 11. ТНС- 0 № 2 с дополнительной антенной

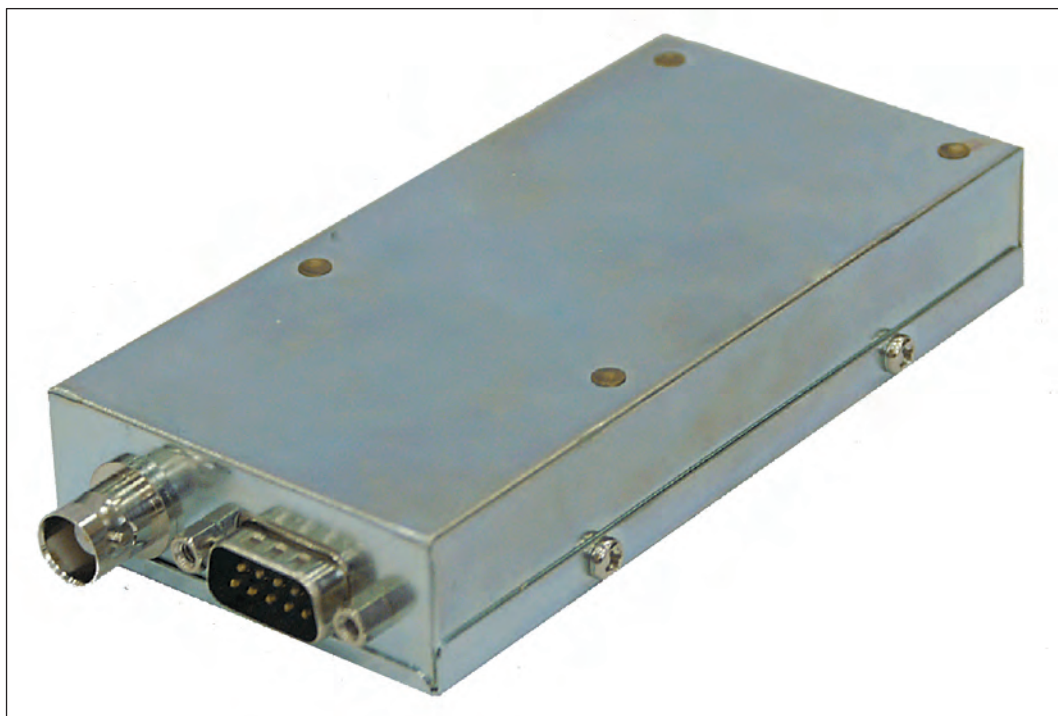


Рис. 12. УКВ-модем Roger KD 9600



Рис. 13. Антенна с круговой поляризацией

данные сохраняются на интернет-сервере провайдера ГЛОБАЛСТАР и могут быть получены оператором ЦУП при восстановлении связи.

Во время полета ТНС-0 №1 использовался асинхронный режим, что негативно отразилось на количестве и продолжительности проведенных сеансов связи.

4. Установка дополнительной приемо-передающей антенны ГЛОБАЛСТАР.

Установка дополнительной антенны (диаметрально противоположно основной) и двух разветвителей позволит расширить суммарную диаграмму направленности антенно-фидерного устройства (АФУ) примерно в два раза, что приведет к существенному повышению количества проведенных сеансов связи. На рис. 11 приведено фото антенного блока ТНС-0 №2 с дополнительной антенной.

5. Введение в состав МКА резервного УКВ канала связи.

Наиболее подходящим по техническим и массово-габаритным параметрам является модем Roger KD 9600. Фото модема приведено на рис. 12.

В наземном УКВ приемном пункте для устранения влияния эффекта Фарадея, связанного с изменением плоскости поляризации принимаемого сигнала, следует применять антенну с круговой поляризацией (рис. 13).

Выводы

1. Из результатов анализа данных, полученных во время ЛКИ ТНС-0 №1, следует, что ин-

формационное поле ССС ГЛОБАЛСТАР не является глобальным и непрерывным. Структура поля зависит от особенностей орбит КА ГС и количества активных аппаратов в группировке.

2. ЛКИ ТНС-0 подтвердили возможность использования канала связи на базе ГЛОБАЛСТАР для управления МКА.

3. Для повышения количества и продолжительности сеансов связи рекомендуется использовать пакет схемотехнических решений из пяти пунктов, разработанных по результатам анализа данных, полученных во время проведения летных испытаний ТНС-0 №1 и представленных в статье. Экспериментальная наземная проверка показала их высокую эффективность. Окончательную проверку новых схемотехнических решений необходимо выполнить в условиях реального космического полета. Такие испытания планируется провести на следующем наноспутнике — ТНС-0 №2.

Список литературы

1. Справочное руководство интегратора спутникового модема передачи данных GSP-1620 QUALCOMM Глобалстар.
2. Отчет по результатам ЛКИ наноспутника ТНС-0 №1.
3. Архивы орбитальных данных с интернет-сайта <https://www.space-track.org>
4. Патент на изобретение № 2520352 от 23.08.2012 г.