

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОВЫСОТНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ

© 2016 Д. Д. Давыдов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье проводится анализ возможности использования информационного ресурса низковысотной спутниковой системы связи (НССС) Globalstar для оперативного обмена данными по каналам: ЦУП–Globalstar – НС; НС – Globalstar – НС. Целью является получение с наноспутников (НС) телеметрической информации и передача на борт НС из центра управления полётом (ЦУП) необходимых команд и информации, а также обмена данными между двумя НС. Показана принципиальная возможность передачи данных с использованием НССС Globalstar. Исследована продолжительность сеансов связи по каналу ЦУП – Globalstar – НС и продолжительность сеансов связи по каналу НС – Globalstar – НС, выполнена оценка возможных объёмов передаваемых данных между двумя НС. Проведён стохастический анализ возможности передачи данных между двумя НС и оценена вероятность передачи данных в зависимости от объёма данных и загрузки системы Globalstar.

Наноспутник, низковысотная система спутниковой связи, передача данных, орбитальная группировка, сеанс связи, центр управления полётом, Globalstar, обмен данными.

Введение

В настоящее время активно развиваются и внедряются технологии использования низковысотных систем спутниковой связи для обеспечения связи между подвижными объектами на Земле. Это обуславливается тем, что проведение сложных экспериментов или других работ с использованием группировок НС зачастую требует наличия канала связи для оперативного получения данных с борта НС и отправки команд на борт НС в режиме реального времени вне зависимости от их нахождения в зоне радиовидимости центров управления полётом. При этом НССС позволяет использовать наземную сеть Интернет для передачи данных от станции сопряжения до ЦУП.

Традиционные средства связи с НС требуют нахождения НС в зоне прямой радиовидимости с приёмопередающими

антеннами ЦУП, что возможно только в определённом диапазоне широт. Использование современных НССС позволяет обеспечить оперативный и дешёвый доступ к процессам, происходящим на орбите, используя передовые IT-технологии. В 2005 году был впервые проведён эксперимент по организации передачи данных через НССС Globalstar на наноспутнике ТНС-0 [1].

Постановка задачи

Для осуществления передачи данных с борта НС в ЦУП требуется передать информацию на один из спутников НССС, который ретранслирует полученные данные на станцию сопряжения, находящуюся на Земле. Далее данные с борта НС предоставляются пользователю через сеть Интернет (рис. 1).

Цитирование: Давыдов Д.Д. Анализ возможности использования низковысотных спутниковых систем связи для оперативного обмена данными // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 1. С. 171-179. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-171-179

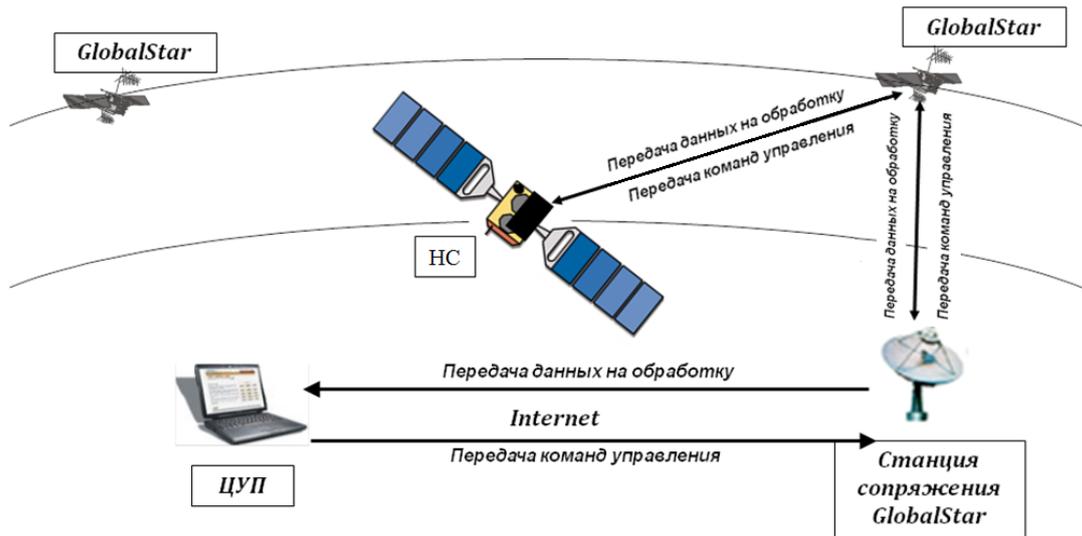


Рис. 1. Схема передачи данных с борта на Землю

Таким образом, для передачи данных требуется осуществить условие одновременной видимости НС с одного из спутников НССС Globalstar, который должен находиться в зоне видимости одной из станций сопряжения (рис.2). Соотношения (1) и (2) определяют моменты времени входа в зону видимости и выхода из неё и имеют вид:

$$\Phi_{CS-GW} = \bar{r}_{CS-GW} \bar{r}_{GW} - \bar{r}_{CS-GW} R_E \sin \gamma_{\min}, \quad (1)$$

$$\Phi_{CS-SC} = \bar{r}_{CS-SC} \bar{r}_{SC} - \bar{r}_{CS-SC} R_{SC} \sin \gamma_{\min}, \quad (2)$$

где γ_{\min} – минимальный угол места; \bar{r}_{GW} – радиус-вектор наземной станции сопряжения; \bar{r}_{CS-GW} – вектор дальности, проведённый от наземной станции сопряжения до спутника НССС; R_E – радиус Земли; \bar{r}_{SC} – радиус-вектор НС; \bar{r}_{CS-SC} – вектор дальности, проведённый от НС до спутника НССС; R_{SC} – радиус орбиты НС.

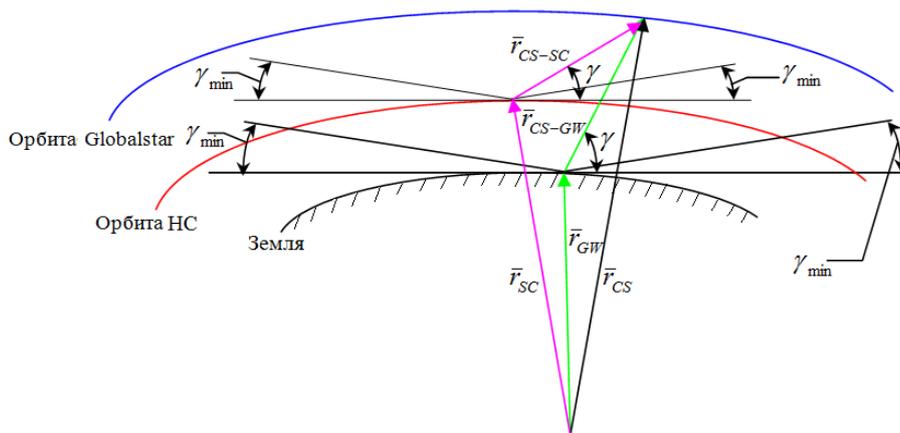


Рис. 2. Определение взаимной видимости спутника НССС с наземной станции сопряжения и НС

Если $\Phi \geq 0$, то имеется взаимная видимость, если $\Phi < 0$, то взаимная видимость отсутствует. Изменение функции Φ с отрицательных значений на положи-

тельные соответствует восходу НС над горизонтом по отношению к наземному пункту. Изменение функции Φ с положительных значений на отрицательные соот-

ветствует заходу НС за горизонт по отношению к наземному пункту. Значение функции Φ , равное нулю, соответствует моментам входа и выхода из зоны взаимной видимости.

Таким образом, для выполнения взаимной видимости «НС – спутник НССС Globalstar – наземная станция сопряжения» должно выполняться условие:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{CS-GW} &\geq 0, \\ \Phi_{CS-SC} &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Это требование необходимо из-за того, что спутники системы Globalstar не имеют возможности передавать данные между собой и работают в качестве ретрансляторов. При использовании НССС, у которых присутствует межспутниковая связь, выполнение условия (3) не требуется.

Анализ возможности передачи данных по каналу ЦУП – Globalstar – НС

Было выполнено многопараметрическое исследование зависимости продолжительности связи с НС при использовании НССС Globalstar от высоты орбиты при различных наклонениях и значениях сдвига орбитальной плоскости $\Delta\Omega$ относительно орбит группировки спутников связи для случаев локального и глобального роуминга. Временной интервал мо-

делирования был выбран из условия, что спутники НССС Globalstar и НС сделают целое число оборотов.

Моделирование эволюции спутников НССС Globalstar проводилось без учёта влияния атмосферы. Для моделирования движения НС и эволюции спутников НССС использовались уравнения движения центра масс в абсолютной геоцентрической системе координат, которые учитывают нецентральность поля тяготения Земли и влияние атмосферы [2].

Результаты моделирования показали, что время связи с НС при использовании системы Globalstar на интервале кратности повторения относительной конфигурации НССС и положения НС на орбите порядка 19 часов может составлять от 80 до 300 минут, а объём передаваемых данных – от 5 до более 20 МБ без использования услуги глобального роуминга. Использование услуги глобального роуминга позволяет увеличить время связи и объём передаваемых данных более чем в три раза.

Анализ возможности передачи данных по каналу НС – Globalstar – НС

Выполнено исследование возможности передачи данных между двумя НС с использованием ресурсов НССС Globalstar (рис. 3).

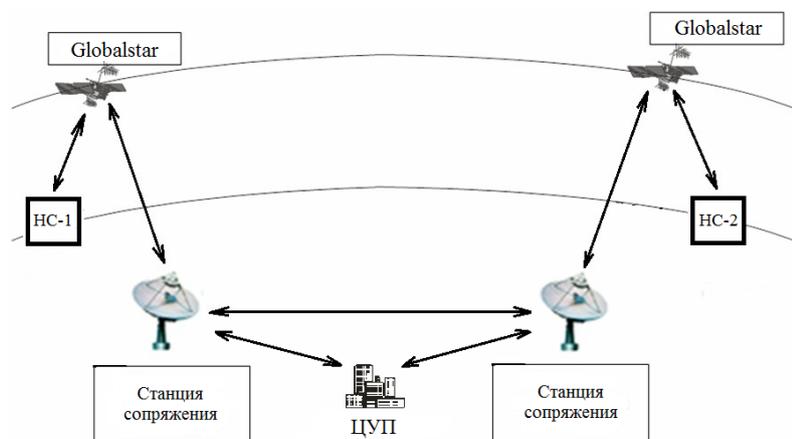


Рис. 3. Схема передачи данных между двумя НС с помощью НССС Globalstar

Построение канала связи между двумя НС возможно при выполнении условия взаимной видимости, то есть только в те моменты времени, когда спутники НССС Globalstar находятся в зоне радиовидимости наземной станции сопряжения и двух НС. Условие взаимной видимости, при выполнении которого возможна передача данных между двумя НС, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{CS-GW} &\geq 0, \\ \Phi_{CS-SC_1} &\geq 0, \\ \Phi_{CS-SC_2} &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Выполнено моделирование для случаев локального и глобального роуминга. Моделирование проводилось для двух спутников, двигающихся по орбитам с одинаковыми параметрами – высотой 510

км и наклоном $97,3^\circ$ – на интервале повторяемости взаимного начального расположения. В результате моделирования выявлено, что при различных значениях относительных сдвигов орбитальных плоскостей двух НС друг относительно друга $\Delta\Omega$ и углового расстояния между двумя НС $\Delta\theta$, не превышающего 25° , имеется возможность осуществлять от 8 до 12 сеансов связи продолжительностью более 5 минут в условиях локального роуминга, а также от 22 до 37 сеансов связи продолжительностью более 5 минут в условиях глобального роуминга на том же интервале повторяемости относительной конфигурации. Стоит отметить, что за тот же интервал времени при увеличении значений $\Delta\Omega$ и $\Delta\theta$ растёт число кратковременных сеансов связи и уменьшается число продолжительных сеансов связи (рис. 4-13).

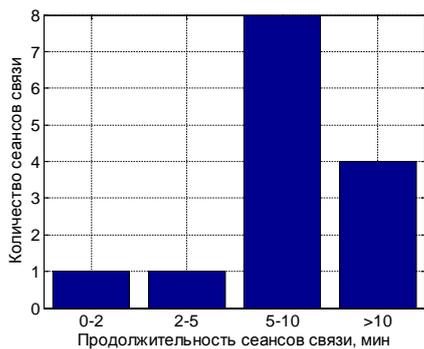


Рис. 4. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\theta = 5^\circ$ и $\Delta\Omega = 0^\circ$ (локальный роуминг)

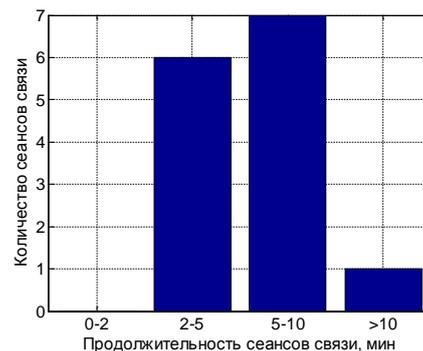


Рис. 5. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\theta = 25^\circ$ и $\Delta\Omega = 0^\circ$ (локальный роуминг)

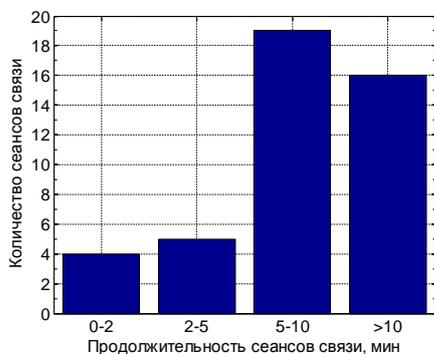


Рис. 6. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\theta = 5^\circ$ и $\Delta\Omega = 0^\circ$ (глобальный роуминг)

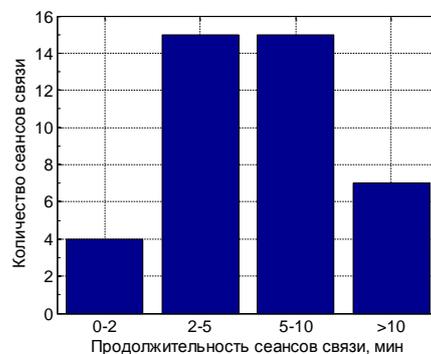


Рис. 7. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\theta = 25^\circ$ и $\Delta\Omega = 0^\circ$ (глобальный роуминг)

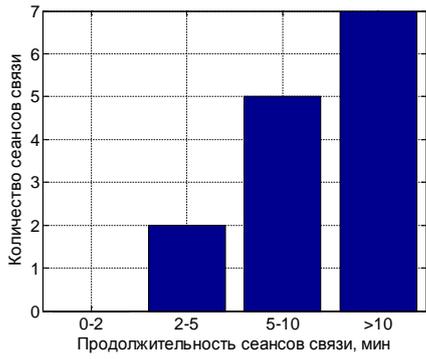


Рис. 8. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\Omega = 5^\circ$ и $\Delta\theta = 0^\circ$ (локальный роуминг)

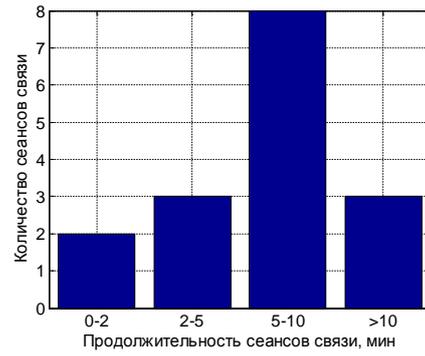


Рис. 9. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\Omega = 25^\circ$ и $\Delta\theta = 0^\circ$ (локальный роуминг)

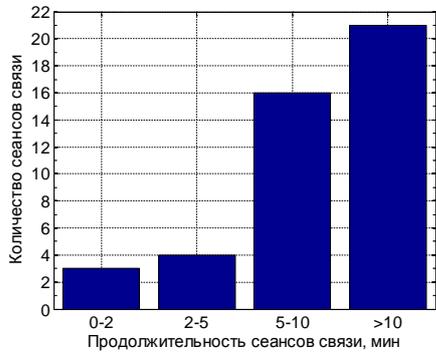


Рис. 10. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\Omega = 5^\circ$ и $\Delta\theta = 0^\circ$ (глобальный роуминг)

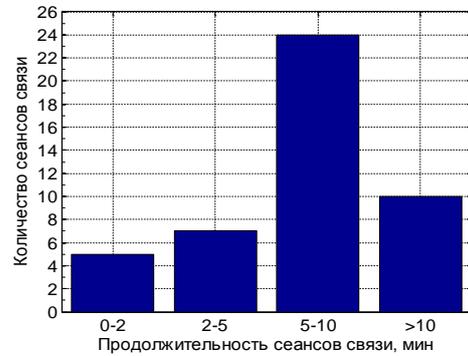


Рис. 11. Количество сеансов связи между двумя НС при $\Delta\Omega = 25^\circ$ и $\Delta\theta = 0^\circ$ (глобальный роуминг)

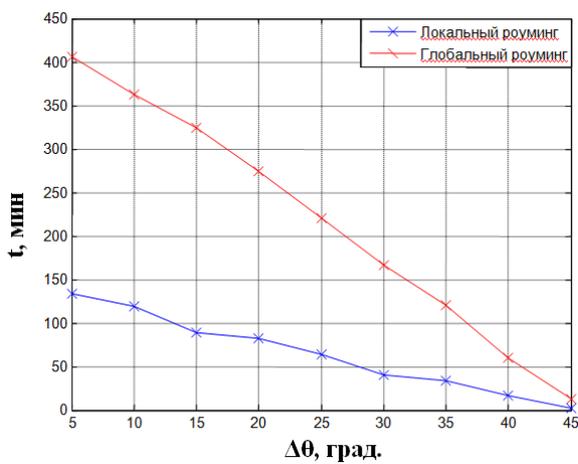


Рис. 12. Общая продолжительность связи в зависимости от углового расстояния между НС $\Delta\theta$ при $\Delta\Omega = 0^\circ$

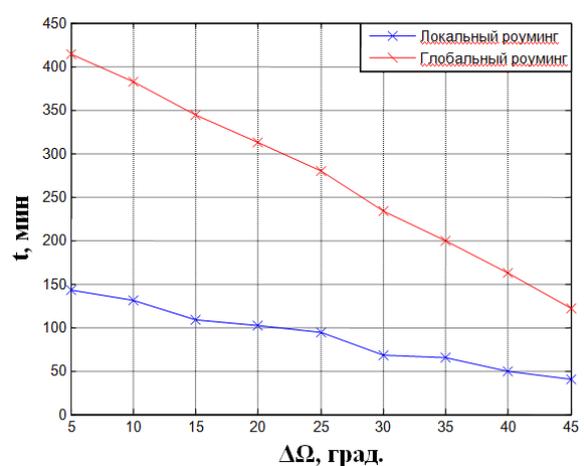


Рис. 13. Общая продолжительность связи в зависимости от сдвига орбитальных плоскостей НС $\Delta\Omega$ при $\Delta\theta = 0^\circ$

**Стохастический анализ
возможности передачи данных
между двумя НС с использованием
НССС Globalstar**

На основе вышеприведённых результатов моделирования сеансов связи был проведён стохастический анализ возможности передачи данных между двумя НС с помощью НССС Globalstar. Для этого была построена вероятностная модель передачи данных, структурная схема которой приведена на рис. 14.

Для определения вероятности передачи данных между двумя НС и спутниками Globalstar (P_1 и P_5) использовался нормальный закон распределения скорости передачи данных Vd в системе Globalstar (рис. 15).

Определение вероятности передачи данных внутри системы Globalstar (P_2, P_3, P_4) выполнено с использованием закона распределения Пуассона в зависимости от количества одновременных запросов n (рис. 16).

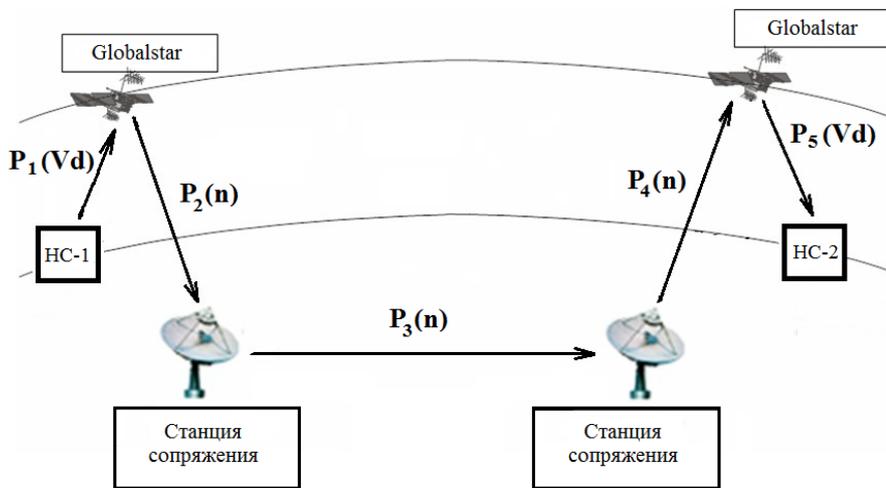


Рис. 14. Структурная схема вероятностной модели передачи данных

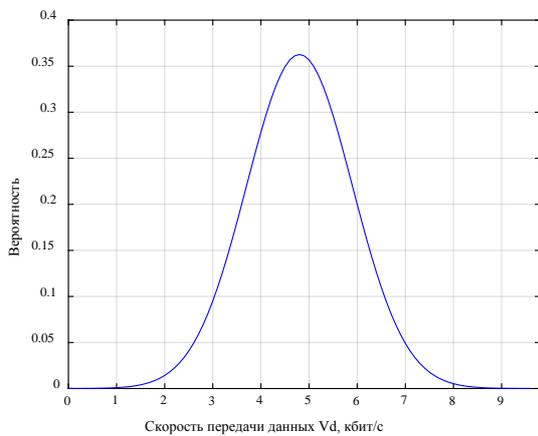


Рис. 15. Распределение скорости передачи данных по нормальному закону

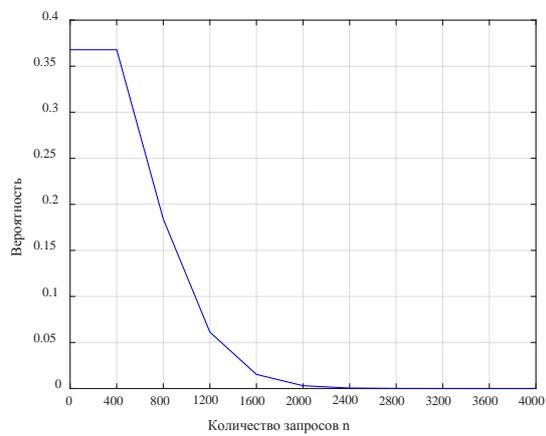


Рис. 16. Распределение количества запросов по закону Пуассона

При оценке вероятности передачи данных в системе Globalstar учитывалась вероятность потери пакетов во время передачи, которая составляет $BER = 10^{-5}$ [3]. Тогда вероятность передачи данных без потери пакетов $P_f = 0,99999$.

Таким образом, общая вероятность осуществления передачи необходимого объема данных через систему Globalstar за

заданный интервал времени рассчитывается по формуле:

$$P = P_1(Vd) \cdot P_2(n) \cdot P_3(n) \cdot P_4(n) \cdot P_5(Vd) \cdot Pf. \quad (5)$$

Результаты расчёта вероятности передачи данных в зависимости от различных значений объёма данных и количества одновременных запросов представлены на рис. 17-19 для интервала 19 часов.

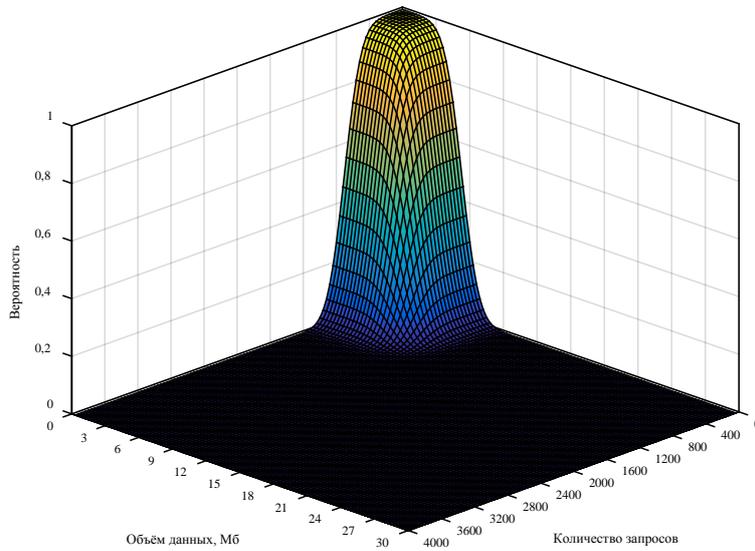


Рис. 17. Вероятность передачи данных за 150 минут

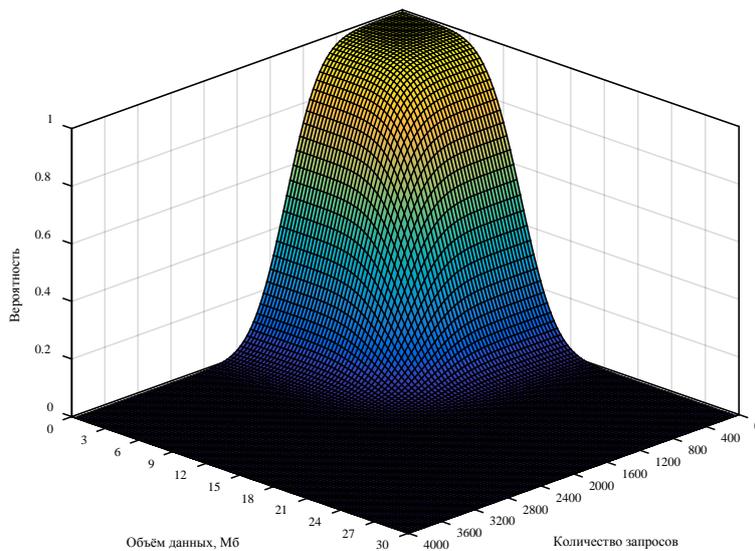


Рис. 18. Вероятность передачи данных за 300 минут

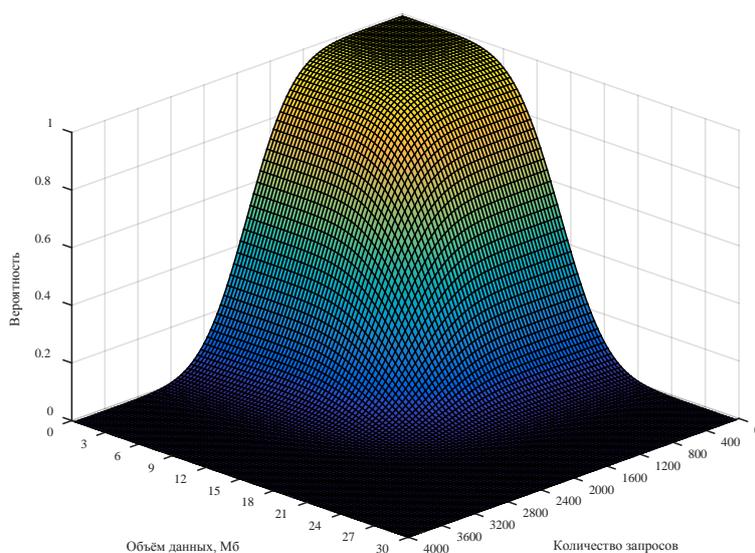


Рис. 19. Вероятность передачи данных за 400 минут

Заключение

Проведён анализ характеристик и динамики покрытия низковысотной спутниковой системой связи Globalstar орбит в диапазоне высот 300 – 1000 км и наклонений 51–95°.

Получены интервалы времени сеансов связи между двумя НС. Оценены объёмы информации, которые можно передать с борта НС в ЦУП с помощью НССС Globalstar, а также выполнена оценка возможного объёма данных, который можно передать между двумя НС для случаев локального и глобального роуминга.

Проведён стохастический анализ возможности передачи данных между двумя НС и оценена вероятность передачи

данных в зависимости от объёма данных и загрузки системы Globalstar.

НССС Globalstar можно использовать для оперативного обмена данными по каналу ЦУП – Globalstar – НС с целью передачи с НС телеметрической информации и передачи на борт НС из ЦУП необходимых команд управления, а также по каналу НС – Globalstar – НС для обмена данными между двумя НС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части госзадания (проект № 9.1421.2014/К).

Библиографический список

1. Ильин А.А., Куприянова Н.В., Пеньков В.И., Овчинников М.Ю., Селиванов А.С. Анализ вращательного движения первого российского наноспутника ТНС-0 по результатам лётных испытаний. Препринт. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2006. http://www.keldysh.ru/papers/2006/rep18/rep2006_18.html.
2. Белоконов И.В. Расчёт баллистических характеристик движения космических аппаратов: уч. пособие. Самара: СГАУ, 1994. 76 с.
3. Колюбакин В. Телефонизация маленьких посёлков и спутниковая связь // Теле-Спутник. 2005. № 1(111). С. 40-43. <http://www.telesputnik.ru/archive/111/article/40.html>.

Информация об авторе

Давыдов Денис Дмитриевич, аспирант межвузовской кафедры космических исследований, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: davydovdenis.ssau@gmail.com. Область научных интересов: навигация и связь в космосе, наноспутники.

POSSIBILITY OF USING LEO SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS FOR ON-LINE DATA INTERCHANGE

© 2016 D. D. Davydov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper presents the analysis of the possibility of using the information resource of the Globalstar LEO satellite communication system (LSCS) for rapid data exchange via the following channels: MCC – Globalstar – nanosatellite, nanosatellite – Globalstar – nanosatellite in order to receive telemetric information from a nanosatellite, to transmit necessary commands and information from MMC to a nanosatellite as well as to exchange data between two nanosatellites. The possibility of data transmission via the channels: MCC – Globalstar – nanosatellite, nanosatellite – Globalstar – nanosatellite is shown. The duration of communication sessions via the channel MCC – Globalstar – nanosatellite and the channel nanosatellite – Globalstar – nanosatellite is analyzed. Potential volumes of data transmitted between two nanosatellites are determined. Stochastic analysis of the possibility of data transmission between two spacecraft is performed and the possibility of data transmission between two spacecraft, depending on the data volume and load level of the Globalstar system is assessed.

Nanosatellite, LEO satellite communication system, data transmission, orbital constellation, communication session, mission control center, Globalstar, data exchange.

References

1. *Analiz vrashchatel'nogo dvizheniya pervogo rossiyskogo nanosputnika TNS-0 po rezul'tatam letnykh ispytaniy* [Analysis of the spin motion of the first Russian nanosatellite TNS-0 based on the flight test results]. Available at: http://www.keldysh.ru/papers/2006/prep18/prep2006_18.html (accessed 10.09.2015).
2. Belokonov I.V. *Raschet ballisticheskikh kharakteristik dvizheniya kosmicheskikh apparatov* [Calculation of spacecraft ballistic characteristics]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1994. 76 p.
3. *Telefonizatsiya malen'kikh poselkov i sputnikovaya svyaz'* [Telephone penetration into small settlements and satellite communication]. Available at: <http://www.telesputnik.ru/archive/111/article/40.html> (accessed 10.09.2015).

About the author

Davydov Denis Dmitrievich, post-graduate student, Department of Space Research, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: davydovdenis.ssau@gmail.com. Area of Research: navigation and communication in space, nanosatellites.