

НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Станислав Олегович Шевчук

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, тел. (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Елена Сергеевна Черемисина

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ, начальник отдела, тел. (911)255-65-58, e-mail: escheremisina@gmail.com

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, г. Новосибирск, Плахотного 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

В статье приводится обзор перспектив создания спутниковых навигационных систем для других планет и объектов Солнечной системы. Проблема рассмотрена на примере Луны, как ближайшего небесного тела. Приводится обзор программ освоения Луны и ближайших планов космических агентств различных стран мира, связанных с пилотируемыми и непилотируемыми миссиями на Луну. Обозначена проблема навигации на лунной орбите и на поверхности Луны, а также возможные пути ее решения. Одним из возможных вариантов решения задачи лунной навигации является создание лунной навигационной спутниковой системы, построение которой может основываться на опыте разработки глобальных навигационных спутниковых систем на Земле. Рассмотрена концепция лунной навигационной аппаратуры потребителя лунной навигационной спутниковой системы, реализованной по подобию ГЛОНАСС. Проанализированы возможные упрощения в расчетах, вызванные отсутствием у Луны атмосферы (и, как следствие, ионосферных и тропосферных задержек) и возмущения C_{20} за счет полярного сжатия в силу его незначительной величины и близости формы Луны к сфере. Сделаны выводы о перспективах данного направления.

Ключевые слова: навигация, Луна, ИСЗ, ГНСС, НАП, концепция, имитационная модель, ИНС.

SATELLITE NAVIGATION EQUIPMENT FOR SOLAR SYSTEM OBJECTS EXPLORATION

Stanislav O. Shevchuk

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russian Federation, Ph. D., Leading Scientific Worker, phone: (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Elena S. Cheremisina

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russian Federation, Head of Department, phone: (911)255-65-58, e-mail: escheremisina@gmail.com

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, Ph.D., Assoc. Prof., the Department of Engineering and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

The article contains the overview of perspective satellite navigation systems for other planets and objects of Solar System. The example of this conception for the Moon is considered. The paper contains the brief overview of Moon exploration perspectives. An overview of countries' space agencies programs on the Moon with automatic and human missions. The problem of lunar and cislunar navigation is considered, the ways of its solution are overviewed. One of the possible cases for lunar and cislunar navigation system realization is to create the satellite system similar to the Earth's GNSS using the existing experiences. The main goal of the article is the conception of lunar receiver designed for the lunar navigation satellite system in case it is similar to GLONASS. The formulas' simplifications because of Moon's features are considered, including: absence of atmosphere and as a result absence of ionospheric and tropospheric delays; more simple gravity field because of small flattening (almost spherical shape). The conclusions on perspectives of the lunar navigation are made.

Key words: navigation, Moon, satellites, GNSS, receiver, concept, imitation model, INS.

Введение

Освоение небесных тел Солнечной системы (планет, естественных спутников, астероидов) является темой, находящейся на стыке современной науки и научной фантастики, вследствие чего – предметом многочисленных спекуляций как в научном мире, так и в популярной культуре [1]. Вместе с тем, данным вопросам посвящено множество серьезных научных исследований и развернуты проекты пилотируемых и непилотируемых миссий, имеющих серьезное финансирование [2, 3].

Важно понимать, что достижение других планет является вопросом не только фундаментальных научных исследований, но имеет и практические перспективы – от межпланетной колонизации [1, 3, 4] (что по-прежнему воспринимается как фантастика) до их использования в качестве источников минеральных ресурсов [5–7]. Основное внимание исследований и разработок на данную тему сконцентрировано на ближайших объектах Солнечной системы – Луне, Марсе, Венере [7–9], а также астероидах [5, 6]. Не меньший интерес вызывают и спутники газовых гигантов [10].

Несмотря на очевидно недостаточный технологический уровень, некоторые из этих проектов могут быть реализованы в ближайшей перспективе. В этом случае как для пилотируемых, так и для автоматизированных миссий встанет ряд вопросов, среди которых и реализация навигации как на орбите, так и на поверхности других планет.

Освоение Луны. Ближайшие перспективы

Наиболее близким к Земле и доступным для исследований небесным телом является Луна. В последние годы большинство стран, имеющих космические программы, обратили на естественный спутник Земли самое пристальное внимание и развернули миссии по ее освоению [11–19].

Так, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) объявила о своей программе Artemis (Артемиды), в рамках которой планируется ряд запусков автономных и пилотируемых лунных аппаратов, новые высадки астронавтов на поверхность Луны и, в перспективе, создание обитаемых лунных баз вблизи Южного полюса Луны [11, 12]. Миссия позиционируется как первый шаг к освоению Марса. На рис. 1 и 2 приведены планы реализации первого и второго этапа миссии Artemis [12].

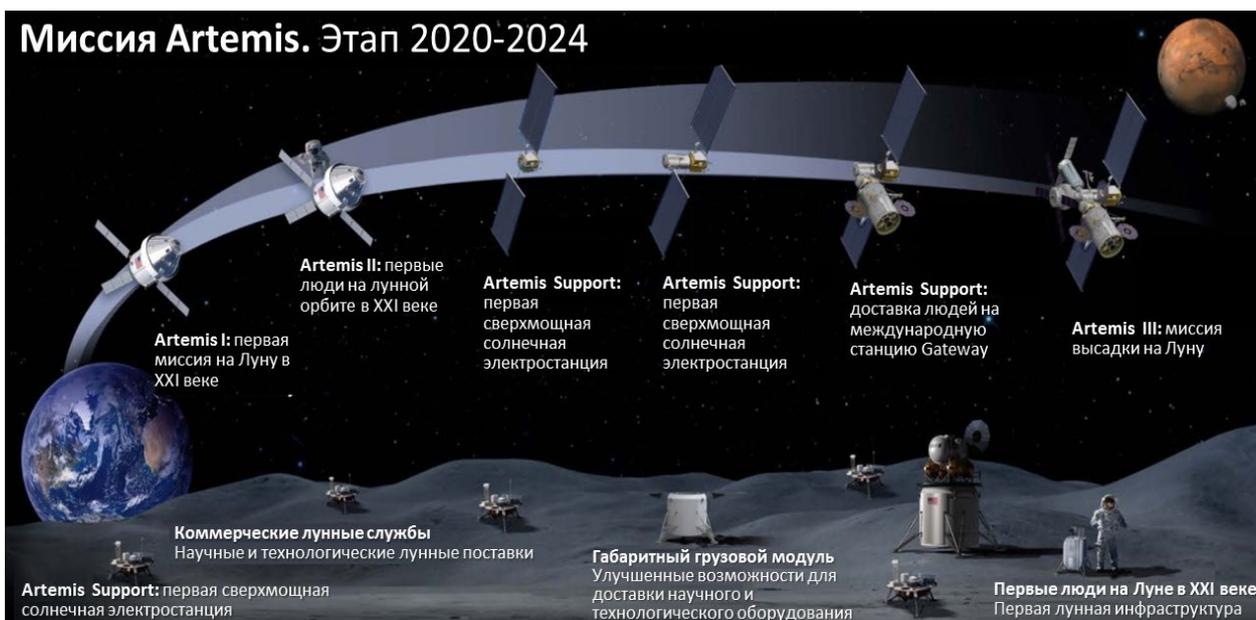


Рис. 1. Миссия Artemis, этап 2020–2024

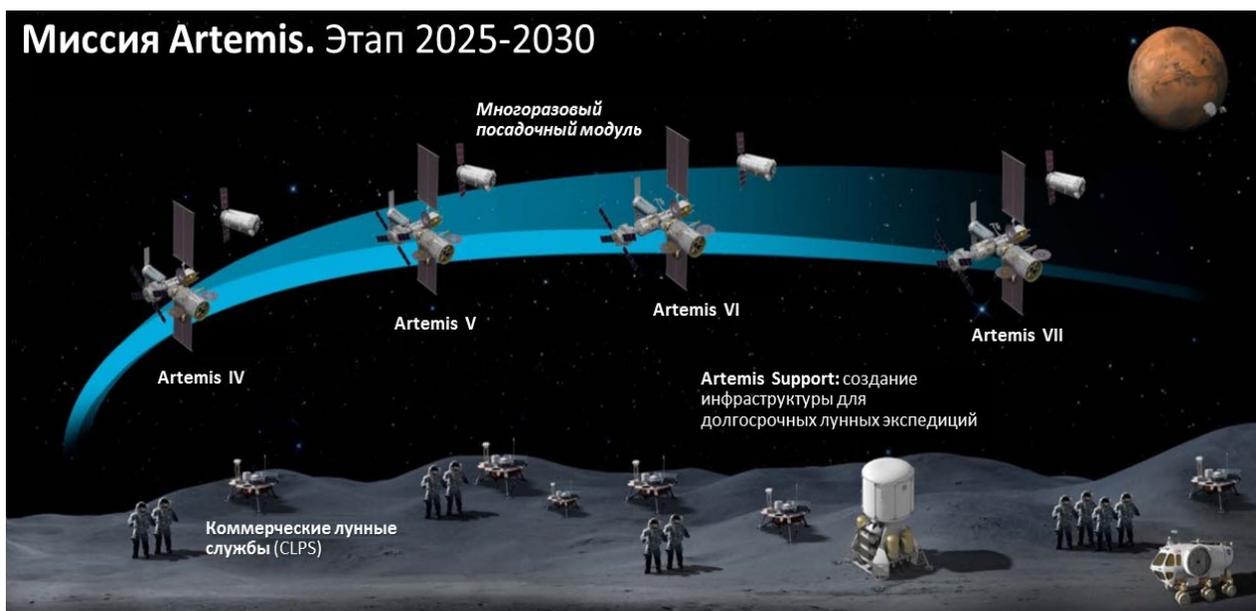


Рис. 2. Миссия Artemis, этап 2025–2030

Космическая программа Китайской Народной Республики (КНР) включает в себя освоение Луны, в том числе развертывание налунной инфраструктуры с высадкой людей [15, 17]. К 2036 году КНР планирует осуществить пилотируемый полет на Луну.

Планы Российской Федерации по освоению Луны озвучены в Федеральной космической программе 2016–2025 года [13, 14]. Так в период с 2021 по 2025 год планируется:

- развернуть до необходимого состава и обеспечить непрерывное и устойчивое управление российскими орбитальными группировками автоматических и пилотируемых космических аппаратов на околоземных орбитах, а также объектов на траекториях полета к Луне и Марсу;

- создать не менее 5 космических аппаратов для проведения углубленных исследований Луны с окололунной орбиты и на ее поверхности автоматическими космическими аппаратами, а также для доставки образцов лунного грунта на Землю;

- создать на космодроме «Восточный» космический ракетный комплекс тяжелого класса для выведения автоматических космических аппаратов, а также выполнить развертывание работ, связанных с ракетой-носителем тяжелого класса для выведения тяжелых автоматических космических аппаратов, пилотируемых кораблей и орбитальных модулей на траектории полета к Луне, облета Луны и лунных орбит.

Кроме этого, планируется развертывание международной лунной орбитальной станции Lunar Gateway, в создании которой примут участие США, Европейский союз, Россия и Япония [16].

В целом, можно констатировать большую заинтересованность космических держав в освоении Луны, перспективность исследований в данной области, и даже некоторую коммерческую привлекательность [20].

Навигация на орбите Луны и на ее поверхности

Освоение Луны, среди прочего, предполагает решение задач координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) на окололунной орбите и лунной поверхности. Задачи КВНО Луны могут быть решены с помощью следующих методов:

- ориентирование по звездам [20, 21];
- лазерная и оптическая дальнометрия [22];
- использование карт гравитационного поля [23, 24];
- использование земных ГНСС (для видимой стороны Луны) [25–28];
- налунные маяки (радионавигация) [20, 21];
- инерциальные навигационные системы (ИНС) [20, 21].

Существует также концепция создания лунного аналога глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) для позиционирования на лунной поверхности [29–33]. Несмотря на малое количество пользователей, собственная лунная спутниковая радионавигационная спутниковая система (ЛСРНС) – один из вероятных путей реализации решения задачи лунной навигации.

О создании такой системы в настоящее время известно немного (в частности, в зарубежных источниках делается упор на использование земных ГНСС [25–28, 34–37]), однако очевидно, что данное направление будет актуально в ближайшие годы с дальнейшим развитием лунных программ разных стран.

В случае создания ЛСРНС также ставится вопрос о количестве спутников и конфигурации орбит [20–22], вплоть до использования галообразных орбит вокруг точек Лагранжа, рис. 3 [38].

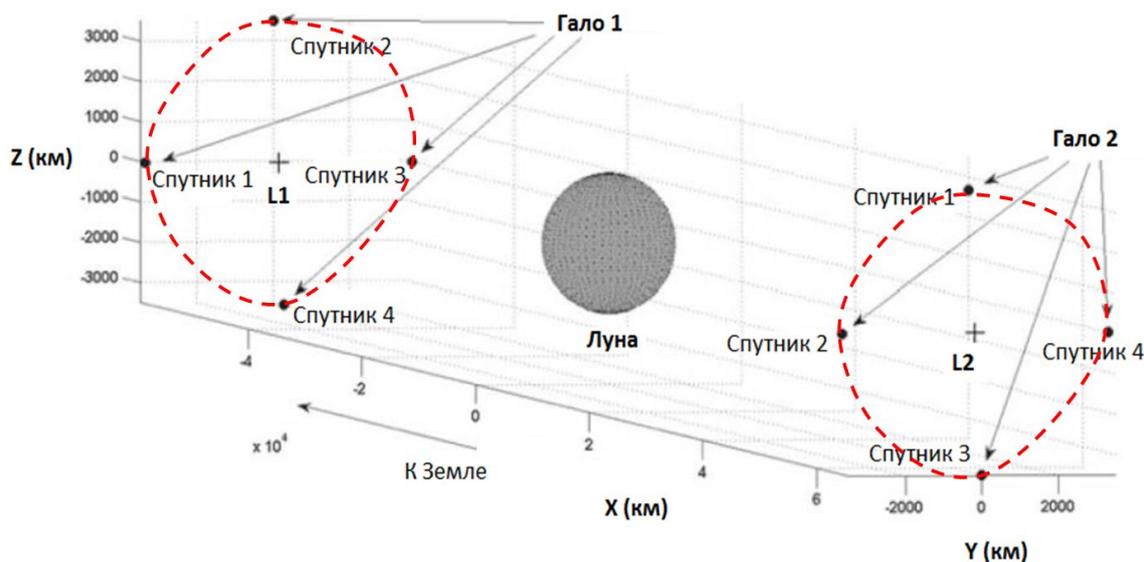


Рис. 3. Реализация орбит ЛСРНС с использованием точек Лагранжа L1 и L2 [38]

Возможная концепция российской навигационной спутниковой системы для Луны

В открытых источниках на данный момент крайне мало информации о российской ЛСРНС, сроках ее развертывания и подробностях ее функционирования.

Существующая информация [39] не подтверждается официальными источниками, однако, исходя из заявлений ключевых сотрудников Роскосмоса [42, 43] и публикаций [39–41], на данный момент система, скорее всего, находится в разработке.

В публикации [30] рассмотрено моделирование различных вариантов орбитальной группировки ЛСРНС, где, в частности, в качестве оптимальной предложена конфигурация из 18 спутников на трех орбитальных плоскостях (по 6 спутников) с шагом 120° , наклонением орбиты 113° и с высотой орбиты 4500 км, рис. 4.

Предположим, что ЛСРНС будет иметь адекватный сегмент управления и контроля, обеспечиваемый наземными и налунными контрольными станциями. Рассмотрим особенности разработки навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ЛСРНС для такой ситуации.

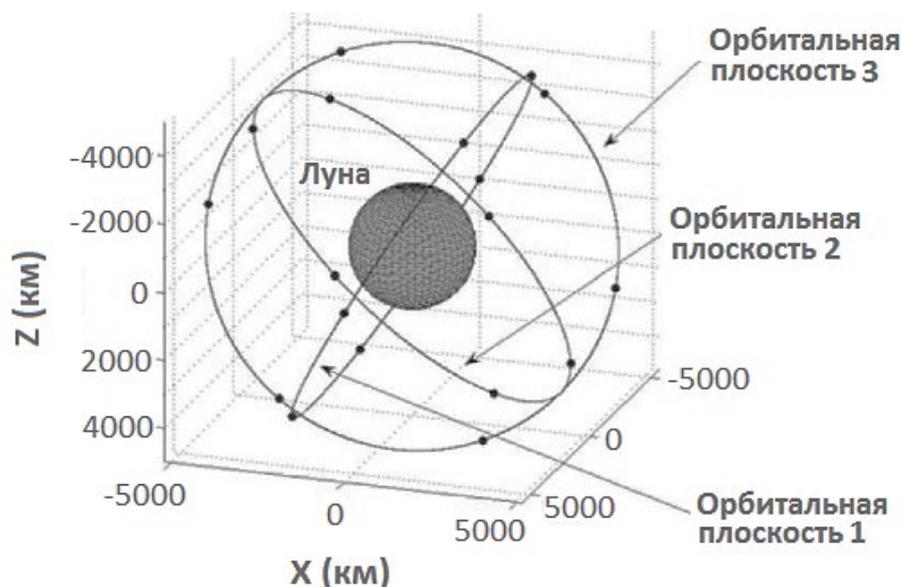


Рис. 4. Конфигурация из 18 навигационных спутников [30, 38]

Концепция НАП ЛСРНС

Приведенная ниже концепция НАП предполагает, что ЛСРНС будет являться аналогом ГЛОНАСС и иметь подобное навигационное сообщение, содержащее точную метку времени, поправки к спутниковым часам и общей шкале времени, а также мгновенные координаты и скорости спутника и возмущающие ускорения [44–46].

Учитывая количество спутников и возможное наличие препятствий для сигналов (в виде рельефа – кромок кратеров, дюн и пр.), рекомендуется совмещать НАП с ИНС сильно- или слабосвязанными алгоритмами. Также могут применяться и другие вспомогательные датчики.

Алгоритм работы лунной НАП концептуально неотличим от земной и включает в себя:

- прием сигналов спутников на заданной частоте (или частотном диапазоне);

- вычисление псевдодальностей. Для кодовых измерений псевдодальности получают по разностям показаний часов приемника t_r в момент приема сигнала t по системному времени и показаний часов спутника i в момент $t - \tau_r^i$ выхода сигнала со спутника [44]:

$$P_r^i(t) = c[t_r(t) - t^i(t - \tau_r^i)] + e_r^i, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; τ_r^i – время прохождения сигнала от спутника i до приемника r ; величина e_r^i является шумом, то есть погрешностью измерений;

– вычисление координат спутников из навигационных сообщений. Так как предполагается идентичность сигналов спутников ЛСРНС сигналам ГЛОНАСС, алгоритмы вычисления эфемерид на заданный момент времени t будут подобны тем, что используются на Земле с оговорками, которые приводятся ниже по тексту;

- решение засечки по псевдодальностям и известным координатам спутников;
- применение алгоритмов связи с ИНС.

Также важно отметить, что при запуске аппаратуры выполняется первичная подготовка к работе – инициализация, – продолжительность которой зависит от актуальности альманаха и соответствия последнего известного местоположения текущему. В случае неактуальности или отсутствия такой информации («холодный» старт) данный процесс будет включать в себя поиск спутников и получение первичной информации об их прогнозируемых местоположениях.

В целом, все перечисленные этапы полностью повторяют алгоритм функционирования наземных спутниковых приемников. Вместе с тем имеются определенные особенности Луны, которые необходимо учесть:

а) Разница в гравитационных и других постоянных, учет которых необходим при моделировании ЛСРНС и ИНС. В таблице 1 приведены величины некоторых параметров Земли и Луны.

Различия в фундаментальных постоянных для Земли и Луны [44, 47–49]

Параметр	Значение	
	Земля (ПЗ90)	Луна (LP150Q)
Гравитационная постоянная $\mu = GM, \text{ км}^3/\text{с}^2$	398 600,44	4 902,799
Большая полуось $a, \text{ км}$	6 378,136	1 737,4
Полярное сжатие, $\alpha, \text{ б/р}$	1 / 298,25645	0,0
Среднее ускорение свободного падения у поверхности $g, \text{ м/с}^2$	9,77–9,85	1,62422
Угловая скорость вращения $\omega, \text{ рад/с}$	$7,292115 \cdot 10^{-5}$	$2,661699 \cdot 10^{-7}$

б) Отсутствие атмосферы [47] и, как следствие, ионосферных и тропосферных задержек в псевдодальностях.

Для ГНСС-измерений на Земле формулы кодовых псевдодальностей имеют вид [44]:

$$P_r^i(t) = \rho_r^i(t, t - \tau_r^i) + I_r^i + T_r^i + dm_r^i + c[dt_r(t) - dt^i(t - \tau_r^i)] + c[d_r(t) + d^i(t - \tau_r^i)] + e_r^i, \quad (2)$$

где $\rho_r^i(t, t - \tau_r^i)$ – геометрическая дальность приемник-спутник, I_r^i – ионосферная задержка, T_r^i – тропосферная задержка, dt_r, dt^i – сдвиги шкал часов

относительно системного времени для спутника и для приемника соответственно, d_m^i – влияние многолучевости, d_r , d^i – запаздывания сигналов в приемнике и на спутнике.

Для ЛСРНС данная формула очевидно упрощается: I_r^i и T_r^i принимаются равными нулю, а значит, основное искажение дальности будет происходить за счет погрешностей часов приемника и спутника, запаздывания сигналов, влияния многолучевости и внутренних шумов приемника.

Также дополнительно необходимо учесть и релятивистские эффекты и взаимную ориентацию антенн приемника и спутника.

в) Форма Луны близка к сфере [47] и, как следствие, имеет пренебрежительно малое полярное сжатие. Это также определяет и ее гравитационные характеристики [47, 48, 50, 51], что, например, значительно упрощает алгоритм вычисления эфемерид на заданный момент времени.

Для Земли формулы вычисления эфемерид, упрощенные для применения в НАП ГЛОНАСС, имеют вид [45]:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= V_X; \\ \frac{dY}{dt} &= V_Y; \\ \frac{dZ}{dt} &= V_Z; \\ a_X &= \frac{dV_X}{dt} = -\frac{\mu_E X}{r^3} + \frac{3C_{20} a_E^2 X}{2r^5} \left(1 - \frac{5Z^2}{r^2}\right) + \omega_E^2 X + 2\omega_E V_Y + \ddot{X}; \\ a_Y &= \frac{dV_Y}{dt} = -\frac{\mu_E Y}{r^3} + \frac{3C_{20} a_E^2 Y}{2r^5} \left(1 - \frac{5Z^2}{r^2}\right) + \omega_E^2 Y - 2\omega_E V_X + \ddot{Y}; \\ a_Z &= \frac{dV_Z}{dt} = -\frac{\mu_E Z}{r^3} + \frac{3C_{20} a_E^2 Z}{2r^5} \left(3 - \frac{5Z^2}{r^2}\right) + \ddot{Z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где X, Y, Z – координаты спутника на момент времени t ;

V_X, V_Y, V_Z – скорости спутников (первая производная координат по времени);

a_X, a_Y, a_Z – полные ускорения спутников;

$\ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z}$ – возмущающие ускорения (суммарное влияние гравитации Солнца и Луны, давление солнечного ветра и пр.);

μ_E – гравитационная постоянная Земли;

r – расстояние приемник-спутник (радиус-вектор спутника);

C_{20} – коэффициент второй зональной гармоники возмущающего гравитационного потенциала Земли;

a_E – малая полуось земного эллипсоида;

ω_E – угловая скорость вращения Земли.

Если ЛСРНС строить по аналогии с ГЛОНАСС, начальные значения (на опорное время t_0) координат, скоростей и возмущающие ускорения ($\ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z}$) будут

содержаться в навигационном сообщении спутника. Считается, что возмущающие ускорения – суммарное влияние Солнца и Земли остаются постоянными на коротких промежутках времени – между обновлениями навигационных сообщений.

В формулах (3) учитывается возмущающее влияние гравитационного потенциала Земли при второй зональной гармонике C_{20} , характеризующей полярное сжатие Земли [44, 45]. Данная часть разложения геопотенциала имеет наибольшее влияние на движение спутников, но для Луны, форма которой близка к сфере, это влияние будет пренебрежимо малым. Таким образом, членами уравнений, содержащих C_{20} , в уравнениях для Луны можно пренебречь. Указанное упрощение, однако, требует исследований корректности его применения для различных высот спутников (чем ниже орбита, тем большее возмущающее влияние внесет неоднородность гравитационного поля).

Тогда формулы ускорений из (3) примут упрощенный вид:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dV_x}{dt} = -\frac{\mu_M X}{r^3} + \omega_M^2 X + 2\omega_M V_y + \ddot{X}; \\ a_y &= \frac{dV_y}{dt} = -\frac{\mu_M Y}{r^3} + \omega_M^2 Y - 2\omega_M V_x + \ddot{Y}; \\ a_z &= \frac{dV_z}{dt} = -\frac{\mu_M Z}{r^3} + \ddot{Z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_M и ω_M – соответственно гравитационная постоянная Луны и скорость ее вращения вокруг собственной оси.

Далее интегрирование может выполняться с заданным шагом, например, методом Рунге-Кутты, аналогично с ГЛОНАСС [44, 45].

Указанные упрощения, однако, будут действовать при достаточно частом обновлении эфемеридной информации, и, в первую очередь, возмущающих ускорений Земли и Солнца. Кроме того, требуются исследования как величины влияния формы Земли на орбиту спутников Луны, так и ее собственной неоднородности гравитационного потенциала [50], которыми в формуле (4) предлагается пренебречь. Возможно, уравнение придется дополнить другими членами разложения гармоник гравитационного потенциала Луны, в случае их значительного вклада в возмущение движения спутников.

Приведенная в статье алгоритмическая модель НАП требует тестирования на имитационных данных. Необходимо также моделирование шумовых составляющих и запаздываний часов, входящих в формулу (2), и закладывание погрешностей в навигационное сообщение для адекватной оценки потенциальной точности лунной НАП.

Заключение

Создание ЛСРНС возможно в ближайшем будущем. Кажущаяся нецелесообразность разворота подобной системы в силу малого количества пользователей компенсируется стратегическими интересами космических держав относительно Луны.

Несмотря на недостаток информации, можно в первом приближении представить аппаратуру, посредством которой будет осуществляться решение навигационных задач на Луне для предполагаемой конфигурации ЛСРНС.

Существующие вопросы по реализации ЛСРНС очевидно будут решены в ближайшие годы, и разработка всех ее сегментов станет актуальным научно-техническим вызовом для разработчиков и ученых в России и за рубежом.

Создание подобной системы для Луны очевидно станет первым шагом к созданию подобных систем и для других планет Солнечной системы (в первую очередь, Марса).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шкловский, И. С. Разумная жизнь как космический фактор [Текст] // Вселенная, жизнь, разум / Под ред. Н. С. Кардашева и В. И. Мороза. — 6-е изд., доп. — М.: Наука. — 1987. — 320 с.
2. NASA Solar system exploration missions [Electronic Resource]. — Mode of access: <https://solarsystem.nasa.gov/contents/solar-missions-list> — Англ.
3. Space X Missions to Mars [Electronic Resource]. — Mode of access: <https://www.spacex.com/mars> — Англ.
4. Yazici S. Building in Extraterrestrial Environments: T-Brick Shell [Text] // Journal of Architectural Engineering 24(1). - 2018.- P. 1-9. — Англ.
5. Ghanim, A. Asteroid mining, Technologies Roadmap, and Applications [Text] / Ghanim, A. [et al.] // Strasbourg: International Space University. 2010. Final Report - Англ.
6. Zacny, K. Asteroid Mining [Text] K. Zacny, M. M. Cohen, W. W. James, B. Hilscher // AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. September.- 2013 .- 16 P. - Англ.
7. Lu Yu., Reddy R. G. Extraction of Metals and Oxygen from Lunar Soil [Text] High Temperature Materials and Processes.- 2008.- Vol. 27, No. 4, PP. 223 - 233. - Англ.
8. Landis, G. A. Colonization of Venus [Text] // Conference on Human Space Exploration, Space Technology & Applications International Forum, Albuquerque NM. 654: 1193–1198. - Англ.
9. Steklov, A. F. Ways of human survival on the Moon [Text] A. F. Steklov, A. P. Vidmachenko, D. N. Minyaylo / 6-th Gamow International Conference in Odessa “New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow” and 19-th Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, August 11-18 2019, p. 57 – 60
10. Blanc, M. LAPLACE: A mission to Europa and the Jupiter system for ESA's Cosmic Vision programme [Text] / M. Blanc Ya. Alibert N. André [et al.] // Experimental Astronomy.: 2009.- 23(3).- P. 849-892 - Англ.
11. National Space Exploration Campaign Report [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nationalspaceexploration_campaign.pdf
12. Forward to the Moon: NASA's Strategic Plans for Human Exploration (updated 09/04/2019) [Electronic Resource]. — Mode of access: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america_to_the_moon_2024_09-16-2019.pdf
13. Основные положения Федеральной космической программы 2016-2025 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/22347/>
14. Стратегическое развитие Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/media/files/docs/2017/dokladstrategia.pdf>
15. Эпштейн В.А., Бочков Д.А., Мухаметзянов Р.Р. Китайская космическая программа: 60 лет эволюции // Ученые записки Казанского университета. Серия гуманитарные науки — 2016. — Т. 158. — С. 1575–1591.

16. JAXA International space exploration [Electronic Resource]. – Mode of access : <http://www.exploration.jaxa.jp/e/program/index.html>
17. Liu L., Li Ji-sheng CHANG'E-5T1 extended mission: The first lunar libration point flight via a lunar swing-by // *Advances in Space Research* – 2016. – Vol. 58. – P. 609–618.
18. Ширшаков А.Е., Моишеев А.А., Карчаев Х.Ж., Лоханов И.В. На шаг впереди (к 80-летию ОКБ НПО имени С.А. Лавочкина) // *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина.* – 2019. – 2(44). – С. 3-18.
19. Claasen F., Henn N., Shade B., Schmid V. The German Space Agency's Moon Exploration Activities // 61st International Astronomical Congress 2010. Space Exploration Symposium. Paper ID: 6976. – 10 p.
20. Kornuta D. [et al.] Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production // *REACH*. – 2013. – Vol. 13. – 188 p.
21. NASA's Lunar Communications & Navigation Architecture [Electronic Resource] . – Mode of access: https://www.nasa.gov/pdf/203072main_LAT2%20C-N%20to%20ESTO%20TEC%202007-11-15%20rev2.pdf.
22. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Митькин А.С., Москатиньев И.В., Сысоев В.К., Ширшаков А.Е. Глобальная оптическая навигационная система для Луны // *Труды МАИ.* 2018. – № 1 (99). – 21 с.
23. На Луне может быть реализована система навигации на основе гравитационного поля [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/~P6vRiZ>
24. Wu L., Gong J., Cheng H., Ma J., Tian J. New method of underwater passive navigation based on gravity gradient // *MIPPR 2007: Remote Sensing and GIS Data Processing and Applications; and Innovative Multispectral Technology and Applications.* 2007. – Vol. 6790 67901V-2. – 8 p.
25. Palmerini G.B., Sabatini M., Perrotta G. En route to the Moon using GNSS signals // *Acta Astronautica.* – 2009. – Vol. 64. – P. 467–483.
26. GPS Based Autonomous Navigation Study for the Lunar Gateway [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20190002311.pdf>
27. Ashman, B. Advancing Space Use of GNSS to Cislunar Space and Beyond [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2019-11/ashman.pdf>
28. Capuano V., Botteron C., Leclère J., Tian J., Wang Y., Farine P.-A. Feasibility study of GNSS as navigation system to reach the Moon // *Acta Astronautica.* – 2015. – Vol. 116. – P. 186–201.
29. Крылов В.И., Яшкин С.Н. Априорная оценка точности определения координат пункта на Луне с помощью навигационных спутниковых систем // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка».* – 2019. – Т. 63., № 1. – С. 13–20.
30. Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В. Анализ устойчивости орбит искусственных спутников Луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина.* – 2016. – № 4. – С. 40-54
31. Чеботарев В.Е., Кудымов В.И., Звонарь В.Д., Внуков А.А., Владимиров А.В. Концепция околослунной навигации // *Исследования наукограда.* – 2014. – № 4 (10). – С. 14–20.
32. Микрин Е.А., Михайлов М. В., Орловский И. В., Рожков С. Н., Семенов А. С., Краснопольский И. А. Навигация околослунных космических аппаратов по измерениям от навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU // *Гироскопия и навигация.* – 2019. – Том 27. – №3 (106). – С. 3-17
33. Микрин Е.А., Михайлов М. В., Орловский И. В., Рожков С. Н., Краснопольский И. А. Спутниковая навигация космических аппаратов на лунной орбите // *Космическая техника и технологии.* – 2018. – №2 (21). – С. 63-70.
34. Capuano V., Blunt P., Botteron C., Tian J., Leclère J., Wang Y., Basile F., Farine P.-A. Standalone GPS L1 C/A Receiver for Lunar Missions // *Sensors.* – 2016. – No. 16. – P. 347-367.

35. Capuano V., Shehaj E., Botteron C., Blunt P., Farine P.-A., Wang B. Availability and ranging error analysis for a GPS L1/L5 receiver navigating to the Moon // 2017 European Navigation Conference (ENC), Lausanne. 2017. – P. 384-358.
36. Silva P.F. [et al.] Weak GNSS Signal Navigation to the Moon // Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), September 16-20, 2013, Nashville, Tennessee. – P. 3357 - 3367.
37. NASA wants to use GPS at the Moon for Artemis missions [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://www.gpsworld.com/nasa-wants-to-use-gps-at-the-moon-for-artemis-missions/>
38. Wang H., Chang X., Yang H., Hou X., Tang J. Enhancement of GNSS in the Cislunar SSV and the Cislunar Navigation Satellite System [Electronic Resource]. – Mode of access: https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/wgb/wgb_04.pdf
39. Для Лунной программы готовят систему навигации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/~oOTrS>
40. На орбите Луны предлагается создать аналог ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/~P6vRi>
41. Russia plans to place satellites around the Moon [Electronic Resource]. – Mode of access: <https://www.gpsworld.com/russia-plans-to-place-positioning-satellites-around-the-moon/>
42. Интервью Дмитрия Рогозина для ТАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/27994/>
43. Интервью Александра Блошенко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/27789/>
44. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии (том 1). – М.: Картгеоцентр; Новосибирск: Наука. – 2005. – 334 с
45. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейс. контрол. док. (ред. 5.1) [Текст] – М. : Координац. науч. - информ. центр ВКС России, 2008. – 74 с.
46. ИКД ГЛОНАСС. Общее описание системы с кодовым разделением, Редакция 1.0. – М.: 2016. – 133 с.
47. Lunar Constants and Models Document, Sep. 23, 2005, JPL D-32296. – 66 p.
48. Williams J. G., Boggs D. G., Folkner W. M. DE430 Lunar Orbit, Physical Librations, and Surface Coordinates. – Jet Propulsion California Institute of Technology Laboratory Interoffice Memorandum IOM 335-JW,DB,WF-20130722-016 July 22, 2013. – 19 p.
49. ГОСТ Р 8.715-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений ускорения свободного падения. – М: Стандартиформ, 2012. – 11 с.
50. Томилова И. В., Пахомова Е. В., Чувашов И. Н. Численная модель движения искусственного спутника Луны. Возможности использования // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 10/2. – С. 166-173.
51. Островский Н.В. О геометрии гравитационного поля Луны // Символ науки. – 2019. – № 2. – С. 6-11.

© С. О. Шевчук, Е. С. Черемисина, Н. С. Косарев, 2020