

## ЗЕМНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЕНОДЕЗИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

**В. Е. Чеботарев, В. И. Кудымов, А. В. Коняев**

*АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация*

*Предложено решение проблемы селенодезического обеспечения лунных спутниковых навигационных систем. Рассмотрены реализованные методы баллистического обеспечения околоземных навигационных спутников в части возможности их применения для лунных спутниковых навигационных систем. При построении селеноцентрической системы координат предложено использовать реализованный для наземных навигационных систем методы создания согласующей модели гравитационного поля и повышения точности аналитической теории движения. Для повышения быстродействия передачи результатов измерений текущих навигационных параметров, полученных на всем видимом участке орбиты, был предложен способ сжатия информации. Повышение оперативности решения задачи по уточнению начальных условий движения предложено осуществить за счет высокоточной аналитической теории движения. Для выполнения сформулированных работ по обеспечению надлежащей точности был создан автоматизированный комплекс определения орбит на базе аналитических методов. Перед началом работ по построению селеноцентрической системы координат достаточно запустить на окололунную орбиту 1-2 спутника и развернуть сеть из 3-4 селенодезических пунктов. Реализовать программное обеспечение в спутниковой навигационной системе возможно с использованием персонального компьютера.*

*Ключевые слова: Луна, лунная спутниковая навигационная система, селенодезический пункт, навигация.*

### Введение

Освоение Луны на постоянной основе обуславливает упреждающее создание лунной спутниковой навигационной системы (ЛСНС), подобной наземным глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС) [1]. Наземные ГНСС создавались в два этапа с использованием различных методов навигации (доплеровский, дальномерный) и различных орбитальных группировок (ОГ) на низких или средних круговых орбитах.

В данной статье рассматривается возможность использования земных навигационных технологий для решения задачи навигационного обеспечения налунных потребителей и селенодезического обеспечения ЛСНС.

### Анализ проблемы селенодезического обеспечения ЛСНС

Спутниковое навигационное обеспечение налунных потребителей возможно при решении

фундаментальных задач селенодезического обеспечения ЛСНС: создание опорной динамической селеноцентрической системы координат и модели гравитационного поля Луны (ГПЛ).

В настоящее время все данные по лунной топографии можно разделить на два типа. Данные, полученные на основе лазерного сканирования лунной поверхности с бортов спутников, хорошо описывают лунный рельеф, но не дают значения координат опорных объектов на Луне. Другой тип данных представляет собой точные координаты опорных объектов, полученных на основе наблюдений прямой привязки их к звездам, но не описывают с достаточной точностью лунный рельеф. Причем все эти системы имеют разные системы отсчета и ориентацию осей координат.

Отметим, что в настоящее время не существует опорной динамической селеноцентрической системы координат, основанной на космических наблюдениях, которая покрывала бы достаточную площадь на лунной поверхности. Несмотря на высокую точность определения физического рельефа Луны космическими миссиями, поверхность отсчета высот точек этого рельефа

представляет собой абсолютно неопределенную фигуру [2].

В настоящее время наиболее подробной и полной из всех построенных ранее является модель разложения рельефа Луны в ряд по сферическим функциям 70 порядка, полученная в Лаборатории реактивного движения (JPL USA) на основе данных миссии Clementine. Сложность построения подробных моделей рельефа Луны обусловлена в первую очередь большим числом входящих в разложение коэффициентов. Модель базируется на сфероиде со сжатием  $1/3234,93$  и средним радиусом 1738 км и покрывает зону, заключенную между  $75^\circ$  северной и южной широтой. Полученная селенографическая модель наиболее достоверна из всех до нее созданных и дает значения поверхностных высот Луны с точностью  $\pm 10$  метров по сравнению с предыдущими значениями  $\pm 0,5 - 1$  км.

Изучение гравитационного поля Луны началось с запуска искусственных спутников Луны. Обращает на себя внимание различие исторической последовательности применения методов определения гравитационного поля Земли и Луны. Для Земли спутниковые методы начали использоваться тогда, когда ее гравитационное поле, в общем, было уже изучено гравиметрическим методом с помощью гравиметров и маятниковых приборов. Эти сведения о поле использовались для расчетов орбит первых искусственных спутников Земли (ИСЗ). В расчетах учитывались возмущения в движениях ИСЗ из-за аномальности гравитационного поля, обусловленной неоднородностью внутреннего строения и формы Земли. Вскоре после запуска первых ИСЗ стала решаться обратная задача: по измерениям возмущений орбит ИСЗ определяться аномальное гравитационное поле Земли. Это составило содержание нового раздела геодезии, называемого динамической космической геодезией. Каждый из методов, спутниковый и гравиметрический, имел свои преимущества и недостатки. Первый из них позволяет более надежно определять гармоники гравитационного поля низких порядков, а второй – высокие гармоники. На практике применяется метод совместного использования обоих этих способов с привлечением астрономических и других геодезических данных. Для Луны же изучение ее гравитационного поля началось сразу со спутниковых методов. В 1966 году Э. А. Аким впервые опубликовал значения коэффициентов разложения гравитационного поля Луны в ряд по сферическим функциям, определенные им по наблюдениям искусственного спутника Луны (ИСЛ) «Луна-10». Детали гравитационного поля Луны в дальнейшем уточнялись по наблюдениям ряда американских ИСЛ: «Лунар», «Орбитер-1, -2, -3, -4, -5», «Эксплорер-35, -49», «Аполлон-14, -15, -16, -17», ИСЛ запущенных с

«Аполлонов-15, -16», и советских ИСЛ «Луна-12, -14, -19, -22» [3].

В настоящее время предложено более полтора десятка различных моделей, которые в чем-то согласуются, а в чем-то различаются между собой. Это объяснимо, ибо для построения моделей были использованы ИСЛ, которые имели различные элементы орбиты ( $\alpha$ ,  $i$ ,  $e$ ,  $\omega$ ) и применялись различные методы обработки наблюдательных данных.

А. Феррари были определены гармонические коэффициенты порядка (16, 16) [4]. Считается, что точность знания весьма неудовлетворительна. Погрешности коэффициентов достигают 90%.

### Анализ проблемы баллистического обеспечения навигационных КА

Баллистическое обеспечение ЛСНС подразумевает решение следующего комплекса задач:

- измерение текущих навигационных параметров (ИТНП) КА ЛСНС налунной сетью селенодезических пунктов (СДП);
- расчет и прогнозирование параметров движения КА ЛСНС (эфемерид).

Создание налунной сети СДП является отдельной задачей, связанной с созданием опорной динамической селеноцентрической системы координат, а качественное эфемеридное обеспечение обусловлено погрешностями модели гравитационного поля Луны.

Рассмотрим принципы баллистического обеспечения ГНСС первого поколения в части возможности их применения для ЛСНС.

Баллистическое обеспечение зарубежной ГНСС «Транзит» и уточнение параметров гравитационного поля Земли осуществлялось глобальной геодезической сетью из 24 станций слежения за спутниками. Передача данных осуществлялась по кабельным линиям с помощью специальной системы «Традат», обеспечивающей высокую скорость передачи информации. Расчет эфемеридной информации производился методом последовательных приближений. На первом этапе уравнивались 415 параметров (6 элементов орбиты и остальные параметры, характеризующие динамику модели движения). На втором этапе с использованием уточненной модели движения рассчитывалась опорная орбита. При быстродействии используемой ЦВМ (полмиллиона операций в секунду) требовалось для расчета полного цикла решения задач около 2,5 ч.

В результате произведенных работ в ГНСС «Транзит» была достигнута точность навигационных определений 80–100 м и создана наземная опорная сеть из 24 пунктов [1]. Специально соз-

данная геодезическая аппаратура позволяла по результатам наблюдений за ИСЗ, полученных на мерном интервале в 1 месяц, обеспечить определение 3-х координат с точностью 1 м [5].

В СССР решения геодезических работ в рамках ГНСС «Цикада» (уточнение параметров гравитационного поля Земли и создание опорной геодезической сети) осуществлялись глобальной геодезической сетью из 12 станций слежения за спутниками. Для достижения паритета по точности навигационных определений были разработаны новые технологии решения геодезических и баллистических задач с использованием аналитических методов [6].

Так, для повышения быстродействия передачи результатов ИТНП, полученных на всем видимом участке орбиты, был предложен способ сжатия информации.

Для повышения оперативности решения задачи по уточнению начальных условий движения была предложена высокоточная аналитическая теория движения, на основе которой была сформулирована методика вывода согласующей модели движения, достаточно просто реализуемой на маломощных вычислительных средствах [6; 7].

Для определения законов влияния различных факторов на решение координатных задач были получены и успешно использованы в работе аналитические методы оценки точности. В частности, предложена технология использования контрольных навигационных пунктов для ИТНП и уточнения координат геодезических пунктов [7, 8].

В ходе выполнения намеченных работ по повышению точности был создан автоматизированный комплекс определения орбит АКП-А на базе аналитических методов, позволяющий решать весь комплекс баллистических задач за 11 минут (вместо 2.5 часа при штатном решении).

Центральное место в повышении точности эфемеридной информации является вывод согласующей модели и на ее основе построение высокоточной геодезической системы координат. Была разработана методика вывода согласующих моделей гравитационного поля для орбит навигационных и геодезических спутников рассмотрим возмущения в элементах орбиты, вызванные погрешностями модели геопотенциала [9; 10].

В методике использовано суммирование по модулю периодических возмущений с одним периодом. Таким образом, задача вывода согласующей модели геопотенциала для навигационных КА сформулирована как задача определения амплитуд и фаз известных функций, аппроксимирующих погрешности в расчёте орбиты КА, обусловленные погрешностями определения коэффициентов разложения геопотенциала [6; 11].

Расчеты на модели показывают, что учет согласующей модели повышает точность определения орбит в 6–7 раз.

Согласующая модель геопотенциала использовалась при построении всемирной геодезической сети. Построение всемирной геодезической сети по радиально-скоростным изменениям осуществлялось по принятой в практике схеме в два этапа. На первом этапе для всего интервала времени, на котором были получены измерения радиальной скорости, по результатам измерений на мерных временных интервалах, равных 3 суткам, производились решения задачи по уточнению параметров орбит. Решения проводились при различном составе возмущений и уточняемых параметров. В конце уточнения параметров орбит для каждой станции наблюдений по всей совокупности имеющихся на мерном интервале измерений составлялась система нормальных уравнений.

На втором этапе все системы нормальных уравнений для каждой станции суммировались, и проводилось их решение. Полученные после решения систем поправки к координатам прибавлялись к известным координатам и с этими значениями координат станций процесс повторялся.

Анализ показал, что влияние на точность построения сети погрешностей знания основных коэффициентов разложения составляет порядка 60–70%. Для получения удовлетворительной точности определения координат всемирной сети достаточно ограничиться 3–4 станциями. Подробно процесс создания сети изложен в [6].

На основании полученных результатов исследований можно предложить следующую схему проведения работ по селенодезическому обеспечению ЛСНС. На первом этапе после запуска 1–2 лунных навигационных КА и развертывании 3–4 лунных станций создается контур баллистического обеспечения лунных навигационных КА, обеспечивающих точность плановых координат 80–100 м [12].

Дальнейшее повышение точности лунной навигационной системы будет связано с повышением точности аналитического метода расчета модели движения лунных КА и уточнением тонких эффектов, влияющих на расчет параметров орбит.

В рамках селенодезической программы за счет создания согласующей модели гравитационного потенциала для КА ЛСНС обеспечиваются высокоточные расчеты прогнозирования параметров движения и высокоточное построение всемирной селенодезической сети, включая в нее сеть станций слежения за навигационными спутниками. Орбита КА ЛСНС круговая, приполярная, высотой более 200 км (по динамике движения соответствует околоземным высотой 1000 км).

Предложенная схема с одной стороны не требует полного разрешения проблемы высоко-

точного определения всех фундаментальных геодезических данных, а с другой стороны найденные параметры согласуются с фундаментальными.

Отметим то свойство орбитального способа построения всемирной геодезической сети, что подобная сеть имеет слабую зависимость точности привязки станций от конфигурации сети. Уже сеть из 3–4 равномерно разнесенных по поверхности Луны пунктов позволяет с удовлетворительной точностью представить селенодезическую модель.

## Заключение

1. Из анализа результатов многочисленных исследований селенодезических параметров можно констатировать, что точность построения фигуры Луны составляет  $\pm 10$  метров. Из созданных порядка 10 моделей гравитационного поля Луны

наиболее подробной и полной на сегодня является модель разложения рельефа Луны в ряд по сферическим функциям 70-го порядка, полученная в Лаборатории реактивного движения (JPL, USA) на основе данных миссии Clementine.

2. Недостатком полученных селенодезических моделей является отсутствие при их выводах динамических результатов, привязанных к центру масс Луны.

3. Для решения селенодезических проблем обеспечения навигационных спутников возможно привлечь технологию решения геодезических задач создания согласующей модели геопотенциала для навигационных КА.

4. Для решения баллистических и селенодезических задач следует использовать разработанный автоматизированный комплекс программ, который был внедрен в отечественной ГНСС первого поколения.

## Список литературы

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев [и др.] ; под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.
2. Вараксина Н. Ю. Создание навигационной опорной сети на поверхности Луны в фундаментальной системе координат : дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.01. Казань, 2013. 205 с.
3. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М. : Высшая школа, 1976. 479 с.
4. Сагитов М. У. Лунная гравиметрия. М. : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1979. 432 с.
5. Волосов П. С., Волынкин Л. И., Мищенко И. Н. Спутниковая радионавигационная система «Транзит» // Зарубежная радиоэлектроника. 1980. № 8.
6. Кудымов В. И. Вывод согласующей модели геопотенциала для орбит геодезических аппаратов // Геодезия и картография. 1990. №4. С. 14–16.
7. Аким Э. Л. Поле тяготения Луны и движение ее искусственных спутников / Э. Л. Аким [и др.]; под ред. акад. В. С. Авдуевского. М. : Машиностроение, 1984. 288 с.
8. Грушинский Н. П. Гравитационная разведка / Н. П. Грушинский, Н. Б. Сажина; под ред. д-р техн. наук К. Е. Веселова. М. : Недра, 1988. 369 с.
9. Демин В. Г. Движение искусственного спутника в нецентральной поле тяготения. Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 420 с.
10. Пеллинен, Л. П. Высшая геодезия. М. : Недра, 1978. 264 с.
11. Чеботарев В.Е., Звонарь В.Д., Грицан О.Б., Внуков А.А. Концепция построения триангуляционной селенодезической сети // Исследования наукограда. 2014. № 2. С. 4–9.
12. Чеботарев В.Е., Кудымов В.И., Звонарь В.Д., Внуков А.А., Владимиров А.В. Концепция околослунной навигации // Исследования наукограда. 2014. № 4. С. 14–20.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 26 апреля 2018 г.*

*Принята к публикации 21 мая 2018 г.*

## CONCEPTION OF MOON SATELLITE NAVIGATION SYSTEM BUILDING

V. E. Chebotarev, V. I. Kudimov, A. V. Konyaev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

*The analysis of the problems of Selenodezic support of lunar satellite navigation systems is carried out. The implemented methods of ballistic support of near-Earth navigation satellites in terms of the possibility of their application for lunar satellite navigation systems are considered. When constructing a selenocentric coordinate system, it is proposed to use methods of creating a matching model of the gravitational field developed for terrestrial navigation systems and increasing the accuracy of the analytic theory of motion. The method of information compression was proposed to improve the speed of transmission of the results of the measurement of current navigation parameters obtained over the entire visible portion of the orbit. High-precision analytical theory of motion was developed to increase the speed of the solution of the problem of clarifying the initial conditions of motion. The automated complex for determining orbits on the basis of analytical methods was created to perform the formulated work to ensure proper accuracy. To start work on the construction of a selenocentric coordinate system, it is enough to launch 1-2 satellites to the near-moon orbit and deploy a network of 3-4 selenodezic points. Software in the Global Navigation Satellite Systems can be organized on a personal computer.*

*Keywords: Moon, moon satellite navigation system, moon station, navigation.*

### References

1. Shebshaevich V. S. Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V. *Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy* [Networked satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio and Communication, 1993. 408 p. (In Russian)
2. Varaksina N. Yu. Creation of the navigation support network on the lunar surface in the fundamental coordinate system : Cand. Diss. Kazan, 2013, 205 p.
3. Venikov V. A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and modeling]. Moscow, Higher School, 1976. 479 p. (In Russian)
4. Sagitov M. U. *Lunnaya gravimetriya* [Moonlight gravimetry]. Moscow, The main editorial board of the physical and mathematical literature of the Nauka Publishers, 1979. 432 p. (In Russian)
5. Volosov P. S., Volynkin L. I., Mishchenko I. N. *Sputnikovaya radionavigacionnaya sistema «Tranzit»* [Satellite radio navigation system «Transit»] // Foreign radioelectronics, 1980, no. 8. (In Russian)
6. Kudymov V.I. *Vывод согласующей модели геопотенциала для орбит геодезических аппаратов* [Derivation of the matching geopotential model for the orbits of geodetic devices] // Geodesy and Cartography, 1990, no. 4, pp. 14–16. (In Russian)
7. Akim E. L. *Pole tyagoteniya Luny i dvizhenie ee iskusstvennyh sputnikov* [The gravitational field of the Moon and the motion of its artificial satellites]. Moscow, Mechanical Engineering, 1984. 288 p. (In Russian)
8. Grushinsky N.P. *Gravitacionnaya razvedka* [Gravitational exploration]. Moscow, Nedra, 1988. 369 p. (In Russian)
9. Demin V.G. *Dvizhenie iskusstvennogo sputnika v necentral'nom pole tyagoteniya* [Motion of an artificial satellite in an off-center gravitational field]. Izhevsk, RDE Regular and chaotic dynamics, 2010. 420 p. (In Russian)
10. Pellinen L. P. *Vysshaya geodeziya* [Higher Geodesy]. Moscow, Nedra, 1978. 264 p. (In Russian)
11. Chebotarev V.E., Zvonar D.V., Gritsan O.B., Vnukov A.A. Concept of triangulation selenodesy network design // The Research of the Science City, 2014, no. 2, pp. 4–9. (In Russian)
12. Chebotarev V.E., Kudymov V.I., Zvonar V.D., Vnukov A.A., Vladimirov A.V. Circumlunar navigation // The Research of the Science City, 2014, no. 4, pp. 14–20. (In Russian)

**Article history**

Received 26 April 2018

Accepted 21 May 2018