

УДК 621.396

Имитация условий работы радиолокатора посадочного аппарата

Л. М. Литвинова, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. С. Полишкаров, *к. т. н., с. н. с., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Наиболее ответственным этапом большинства космических проектов по исследованию планет Солнечной системы и их спутников является посадка спускаемого аппарата на поверхность, от результатов которой зависит успех миссии в целом. Важную роль в процессе посадки играет радиолокатор, измеряющий вектор скорости и высоту посадочного аппарата относительно поверхности. Определенную уверенность в положительном исходе процесса посадки могут дать результаты наземных испытаний, достоверность которых зависит от степени воспроизведения ожидаемых условий работы посадочного радиолокатора. В статье рассматриваются подходы к имитации условий работы посадочного радиолокатора в ходе наземных испытаний.

Ключевые слова: посадочный аппарат, радиолокатор, отражающая поверхность, параметры движения

Для цитирования: Литвинова Л. М., Полишкар В. С. Имитация условий работы радиолокатора посадочного аппарата. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 1. С. 72–78.

Simulation of the Operating Conditions of the Lander Radar

L. M. Litvinova, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. S. Polishkarov, *Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The most critical stage of most space projects to explore the planets of the solar system and their satellites is the landing of the lander on the surface, the results of which depend on the success of the mission as a whole. An important role in the landing process is played by a radar, which measures the velocity vector and height of the lander relative to the surface. A certain confidence in the positive outcome of the landing process can be given by the results of ground tests, the authenticity of which depends on the reproduction degree of the expected operating conditions of the landing radar. The paper discusses approaches to simulating the operating conditions of a landing radar during ground tests.

Keywords: lander, radar, reflective surface, motion parameters

For citation: Litvinova L. M., Polishkarov V. S. Simulation of the Operating Conditions of the Lander Radar. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 72–78. (in Russian)

Космические миссии к планетам Солнечной системы и их спутникам часто включают задачу мягкой посадки на поверхность [1]. От положительного решения этой задачи зависит успех всей миссии и поэтому необходимо убедиться заранее, на Земле, что все системы, участвующие в этом процессе, работают корректно. Чтобы на Земле осуществить требуемые испытания, необходим испытательный полигон [2]. Рассмотрим этот вопрос применительно к лунному посадочному радиолокатору [3]. Он должен измерять вертикальную и горизонтальную составляющие скорости посадочного аппарата и высоту до поверхности Луны. Во время наземных испытаний, во-первых, надо выполнить имитацию условий посадки, то есть обеспечить вертикальную скорость в диапазоне от 0 до 120 м/с, горизонтальную скорость от 0 до 20 м/с и высоту от 0 до 5 км. Во-вторых, необходимо имитировать условия отражения радиосигнала от подстилающей поверхности, которая может радикально отличаться от земной [4]. И, в-третьих, для оценки точностных характеристик радиолокатора требуются эталонные значения характеристик движения посадочного аппарата.

Обеспечить во время испытаний перемещение радиолокатора в пространстве можно с помощью летательного аппарата [5], однако вертикальную скорость в требуемом диапазоне испытательные самолеты и вертолеты обеспечить не смогут. Имеется опыт привлечения парашютистов к испытаниям, когда радиолокатор крепится к телу испытателя и может какое-то время находиться в состоянии свободного падения, что также не в полной мере имитирует спуск посадочного аппарата. Да и с отражающей поверхностью не все так просто, найти на Земле участок достаточной площади с грунтом, напоминающим лунный, не легко, да и его географическое положение будет, скорее всего, значительно удалено от завода-изготовителя локатора.

Альтернативой может служить перемещение радиолокатора по вертикальному (наклонному) неметаллическому тросу с помощью тросохода. Такие механизмы широко используются при телевизионных съемках больших пространств, имеют дистанционное управление, обеспечивают прогнозируемое перемещение объекта испытаний. Однако имеются ограничения по высоте подвеса (не более

100–120 м) и скорости перемещения (необходимо иметь запас хода на торможение).

Оба рассмотренных варианта подвержены влиянию погодных условий, что может отрицательно повлиять на график работ. К дополнительным затратам времени приведет необходимость выполнения подготовительных работ, доставка локатора к месту испытаний, монтаж изделия на подвижном объекте и последующий демонтаж.

Краткий анализ существующих методов имитации позволяет сделать вывод, что для преодоления их негативных качеств должен быть предложен более совершенный метод:

- позволяющий проводить испытания в закрытом от внешних атмосферных воздействий сооружении, расположенном вблизи завода-изготовителя;
- не требующий многократного монтажа и демонтажа объекта испытаний;
- использующий искусственное отражающее покрытие, повторяющее по электрофизическим характеристикам лунный грунт;
- включающий средства измерения характеристик движения спускаемого аппарата с высокой точностью;
- позволяющий оперативно в ходе испытаний корректировать программное обеспечение и проводить доработки аппаратуры.

Метод с перечисленными выше характеристиками может быть реализован на стационарном стенде для имитации работы дальномерного канала радиолокатора, который содержит:

1. Имитатор отражающей поверхности, состоящий из двух «коаксиальных» эллиптических цилиндров. Размеры цилиндров определяются угловым положением лучей радиолокатора относительно продольной оси спускаемого аппарата (СА), шириной диаграммы направленности антенны (ДНА) и максимальными углами отклонения оси СА от нормали к поверхности. При имитации высоты и вертикальной составляющей скорости размеры цилиндров в первую очередь зависят от максимального значения имитируемой высоты. Поверхность цилиндров имитирует отражающую поверхность Луны и обеспечивает формирование отраженного сигнала радиолокатора. Внутренний цилиндр имитирует

электрофизические свойства реголита, а внешний цилиндр — коренных пород Луны. Пространство между внутренним и внешним цилиндрами заполнено диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью, соответствующей реголиту. Пол и потолок должны иметь поглощающее покрытие.

Для имитации максимального диапазона изменения вертикальной скорости ± 120 м/с и максимальных углов отклонения оси антенно-фидерного устройства (АФУ) радиолокатора от нормали к поверхности ± 20 град. ориентировочно потребуются внутренний цилиндр с большой осью 90 м и высотой 170 м. Если при данных испытаниях не имитировать отклонение оси АФУ, то высоту цилиндра можно уменьшить до 48 м. Однако и в том и другом случаях необходимо строительство специального сооружения, которое потребует значительных капитальных затрат. Испытательный стенд с размерами, позволяющими размещение в приспособленном помещении, может иметь большую ось не более 100 м, малую ось — 50 м и высоту не более 10 м. В этих условиях имитация параметров движения посадочного радиолокатора по двум любым лучам из четырех возможна в следующих диапазонах:

- скорости изменения высоты — $\pm(0-120)$ м/с;
- высоты — 0,5–100 м (предложения по расширению диапазона имитируемых высот приведены в конце статьи).

2. Трехкоординатное опорно-поворотное устройство для размещения радиолокатора, расположенное внутри имитатора отражающей поверхности. Устройство должно обеспечивать размещение испытуемого изделия на высоте 1/2 от высоты имитатора отражающей поверхности, его поворот на 360 град. с максимальной скоростью 1/2 оборота в секунду, отклонение оси АФУ в угломестной плоскости на ± 20 град., поворот АФУ вокруг своей оси на ± 180 град. Опорно-поворотное устройство (ОПУ) имеет возможность перемещения по большой оси эллиптического основания цилиндра на расстояние от 0 до 45 м от центра. Управление ОПУ осуществляется от персонального компьютера (ПК) стенда.

3. Лазерный измеритель текущего фактического расстояния от центра АФУ до отражающей поверхности.

4. Бесконтактное устройство для снабжения радиолокатора электропитанием, передачи измерительной информации и телеметрии (ТМ) от радиолокатора в ПК стенда и командной информации на радиолокатор.

5. ПК управления стендом.

Условное изображение стенда с радиолокатором на ОПУ приведено на рис. 1.

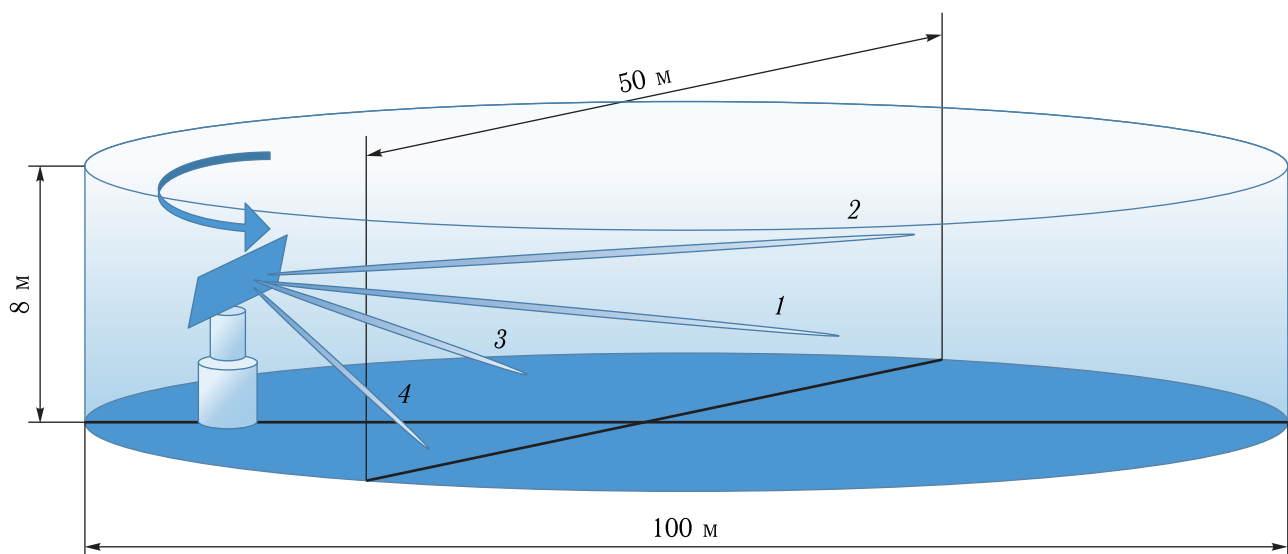


Рис. 1. Условное изображение стенда

Fig. 1. Conditional representation of the stand

Математическое описание моделей

В данной работе используется модель эллипса, заданного параметрически [6]:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + a * \cos(\theta), \\ y &= y_0 + b * \sin(\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

где x_0, y_0 — смещение относительно начала координат, a — длина большой полуоси, b — длина малой полуоси, θ — угол, принадлежащий $[0, 2\pi]$.

Расстояние от ОПУ до каждой точки на эллипсе вычисляется следующим образом: задаются координаты ОПУ ($x_{\text{опу}}, y_{\text{опу}}$), а точки на эллипсе описываются координатами (x_i, y_i). Тогда для нахождения расстояния необходимо определить разницу между координатами:

$$\begin{aligned} Dx &= x_{\text{опу}} - x_i, \\ Dy &= y_{\text{опу}} - y_i. \end{aligned} \quad (2)$$

После чего из известных Dx и Dy рассчитывается расстояние от ОПУ до точки на эллипсе:

$$R = \sqrt{Dx^2 + Dy^2}. \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) позволяет вычислить расстояние. На рис. 2 показано графическое представление решения данной задачи.

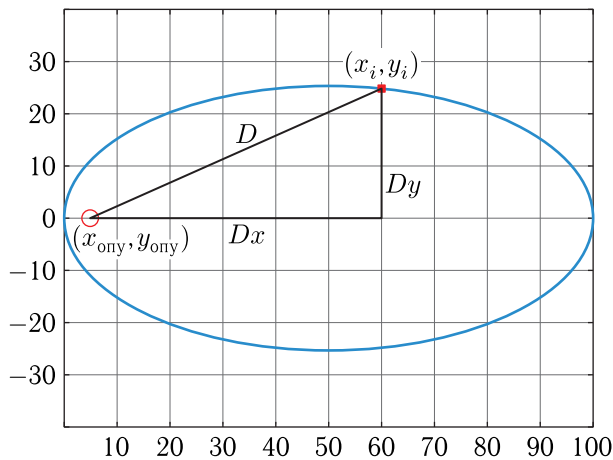


Рис. 2. Графическое представление вычисления расстояния от ОПУ до точки на эллипсе

Fig. 2. Graphical representation of calculating the distance from the rotary support to a point on an ellipse

Далее в среде MATLAB производится привязка вычисленных расстояний ко времени оборота ОПУ.

Для вычисления радиальной скорости необходимо вычислить производную от функции зависимости вычисленных расстояний от времени:

$$V_r = \frac{dR(t)}{dt}. \quad (4)$$

Линейная скорость в данном моделировании принимается постоянной и определяется следующим образом:

$$V_l = \frac{L}{T}, \quad (5)$$

где L — периметр эллипса, который определяется формулой (6); T — время, продолжительность одного оборота ОПУ,

$$L = 2\pi\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}. \quad (6)$$

Суммарная скорость определяется исходя из правила сложения векторов:

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_l^2 - 2V_r V_l \cdot \cos(\beta)}, \quad (7)$$

где β — угол параллелограмма, который вычисляется по следующей формуле:

$$\beta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - (\alpha_r + \alpha_l), \quad (8)$$

где α_r — угол, под которым происходит сканирование в данной точке, α_l — угол касательной линейной скорости в данной точке эллипса.

Угол касательной в каждой точке эллипса определяется через производную, так как производная функции в конкретной точке равна тангенсу угла наклона касательной к графику функции в этой точке. Следовательно, необходимо вычислить производные эллипса в каждой точке:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (9)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x \cdot b^2}{y \cdot a^2}. \quad (10)$$

Выражение (9) — каноническое уравнение эллипса. Из (10) определяем угол наклона касательной:

$$\alpha_l = \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) = \arctan\left(-\frac{x \cdot b^2}{y \cdot a^2}\right). \quad (11)$$

Для определения угла сканирования задается коллинеарная прямая, которая совпадает с большой осью эллипса. Направляющий вектор к этой прямой — $\bar{q}(x_0; y_0)$. Также необходимо задать прямые между точкой расположения ОПУ и каждой точкой на эллипсе. Направляющий вектор к этой прямой — $\bar{p}(x_i; y_i)$. Таким образом, в частном случае имеются две прямые. Угол между ними определяется следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \arccos\left(\frac{\|\bar{p} \cdot \bar{q}\|}{\|\bar{p}\| \|\bar{q}\|}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{|x_i x_0 + y_i y_0|}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cdot \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, выражения (11) и (12) позволяют рассчитать суммарную скорость по выражению (7).

Ускорение определяется через производную суммарной скорости от времени:

$$a = \frac{dV(t)}{dt}. \quad (13)$$

При использовании окружности вместо эллипса применяются такие же соображения, так как при равных полуосях эллипс вырождается в окружность.

Для оценки характеристик стенда в части имитации реальных условий работы радиолокатора проведено его математическое моделирование в среде MATLAB. Объем моделирования позволил произвести анализ следующих характеристик стенда:

1. Зависимость изменения дальности до отражающей поверхности от угла поворота ОПУ для начального положения ОПУ на большой оси эллипса.
2. Зависимость изменения радиальной скорости от времени (в долях периода вращения ОПУ) для начального положения ОПУ на оси.
3. Зависимость изменения радиального ускорения от времени для начального положения ОПУ на оси.
4. Зависимость изменения линейной скорости от времени для начального положения ОПУ на оси.
5. Зависимость изменения суммарной скорости от времени для начального положения ОПУ на оси.

Данные зависимости также были получены для различных положений ОПУ на большой оси эллипса, а также для различных размеров эллипса.

На рис. 3–6 представлены некоторые результаты моделирования при размерах большой оси эллипса 100 м, малой 50 м, периметре эллипса — 248,4 м. ОПУ находится в координатах относительно эллипса [5, 0], время оборота равно 1 с.

Линейная скорость принимается постоянной и равной 248,4 м/с.

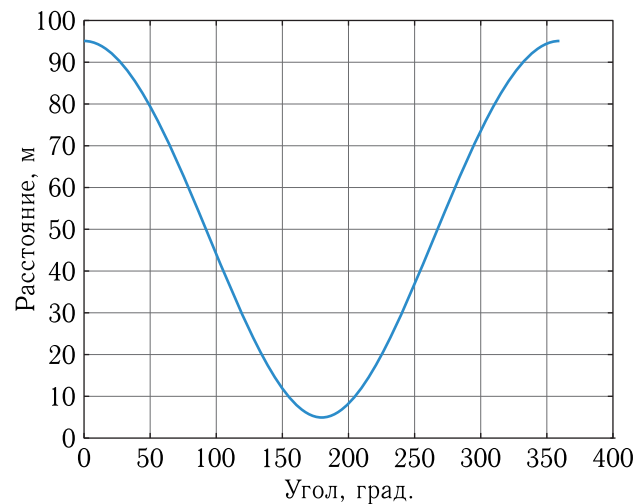


Рис. 3. Зависимость изменения дальности от угла поворота ОПУ

Fig. 3. Dependence of range variation on the angle of rotation of the rotary support

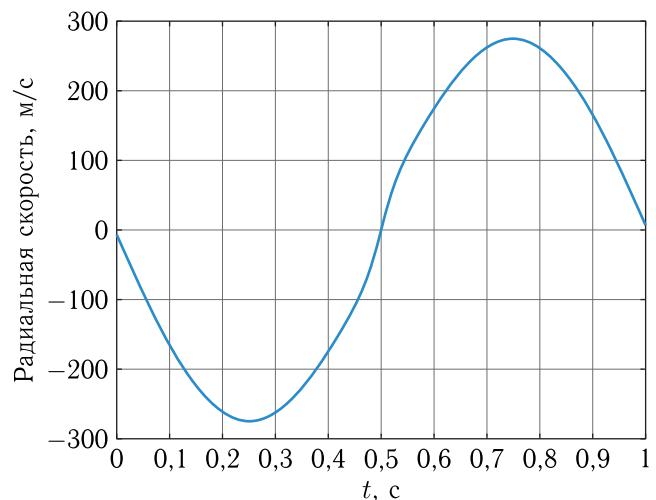


Рис. 4. Зависимость изменения радиальной скорости от времени

Fig. 4. Dependence of radial velocity change on time

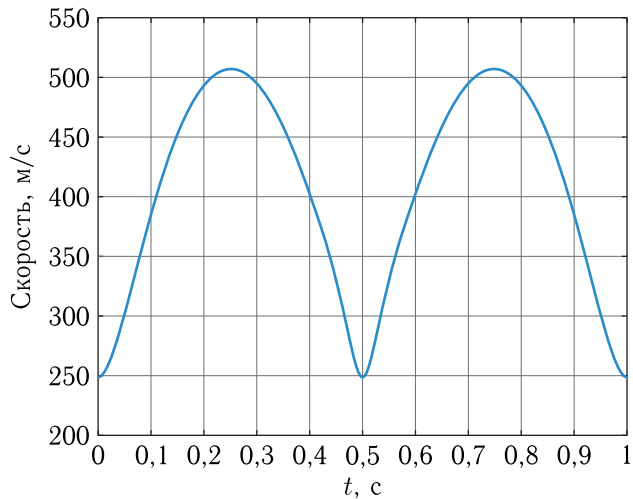


Рис. 5. Зависимость изменения суммарной скорости от времени

Fig. 5. Dependence of total velocity variation on time

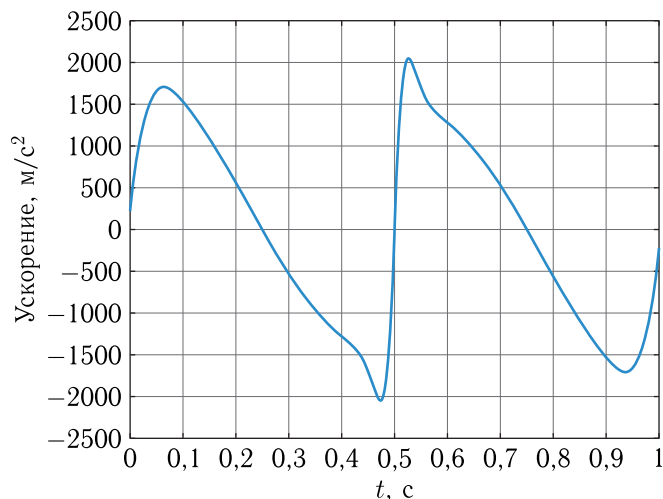


Рис. 6. Зависимость изменения радиального ускорения от времени

Fig. 6. Dependence of radial acceleration variation on time

Выводы и предложения по полученным результатам

В ходе моделирования стенда для оценки погрешности измерения высоты радиолокатора были рассмотрены отражающие поверхности в виде эллиптического цилиндра со следующими размерами: высота 8 м, размеры основания: большая ось — 100 м, малая — 50 м, 80 м и 30 м, 60 м и 32 м, 50 м и 20 м, а также в виде цилиндра со следующими значениями радиуса основания: 50 м, 40 м и 30 м.

По полученным результатам можно сделать вывод, что использование эллипса с длинами осей в 100 м и 50 м позволяет имитировать расстояние в диапазоне 0–100 м. Имитируемый диапазон скоростей составляет от 0 до 514,3 м/с. При использовании в качестве основания эллипса с меньшими размерами уменьшается диапазон имитируемых расстояний, а также максимальная скорость, которую можно имитировать, соответствуя требованиям по ускорению. К преимуществам использования эллипса с меньшими размерами относятся меньшие затраты на реализацию и упрощение поиска подходящего помещения.

Увеличение размеров эллипса улучшает исследуемые характеристики: можно достичь имитации максимальной скорости 120 м/с, а также увеличить диапазон измеряемых расстояний. Однако это приведет к значительному увеличению затрат на реализацию и усложнению поиска подходящего помещения. Если отказаться от использования помещения, то можно заменить его открытым полигоном без крыши, применяя навес только над чувствительными к осадкам частями конструкции.

Исследование отражающей поверхности с основанием в виде окружности радиусом 50 м показало, что она позволяет имитировать расстояния от 0 м до 100 м, а максимальная имитируемая скорость составляет 628,3 м/с (при положении ОПУ на границе), максимально возможная скорость без превышения требований по ускорению достигает 120 м/с. Необходимо отметить, что при размещении ОПУ вблизи границ основания изменение скорости составляет порядка 10 м/с в течении одного оборота ОПУ, в то время как при размещении ОПУ ближе к центру изменение скорости незначительное (порядка 1–2 м/с). Уменьшение радиуса ведет к сокращению измеряемого диапазона расстояний, однако максимальная возможная скорость остается прежней.

Проведенные исследования предлагаемого варианта построения стенда для отработки посадочного радиолокатора показали, что:

1. Принципиально возможно построение стационарного стенда, позволяющего имитировать условия движения космического аппарата на траектории посадки на поверхность Луны.

2. Диапазон имитации вертикальной и горизонтальной скоростей спуска перекрывает требования.

3. Диапазон имитируемой дальности ограничен размерами основания отражающей поверхности и может достигать 0–300 м.

4. Смещение диапазона имитируемой дальности в сторону больших значений возможно за счет включения в радиочастотный тракт линии задержки, например оптической.

5. Отражающая поверхность искусственная, что позволяет обеспечить ее соответствие характеристикам реголита в части отражающей способности на частотах работы радиолокатора.

6. Имеется возможность прецизионного обмена отражающей поверхности с помощью лазерного дальномера для последующего сравнения с результатами измерений радиолокатора и оценки его точностных характеристик.

7. Стенд позволяет оперативно без длительной подготовки проводить испытания изделия.

8. Испытания могут проводиться многократно или непрерывно в течении требуемого времени.

9. Доработку программного обеспечения и аппаратной части можно осуществлять непосредственно на стенде в процессе наземной экспериментальной отработки без потери времени.

Планируется выполнить ряд исследований, связанных с этой темой, которые расширят и дополнят информацию, представленную в статье:

- исследование вопросов имитации свойств отражающей поверхности и включение их в математическую модель;
- исследование характеристик отраженного сигнала в условиях работы радиолокатора в составе стенда.

Список литературы

1. Every Mission to the Moon, Ever. Текст: электронный // The Planetary Society. <https://www.planetary.org/articles?keywords=lunar-reconnaissance-orbiter> (Дата обращения 15.10.2024).
2. Алексеева А.М., Лепехина Т.А., Николаев В.И. Создание и оснащение радиолокационных подспутниковых полигонов для летных испытаний, калибровки и валидации космических РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2024, № 4. С. 56–66.
3. Тепляков И.М. Радиолокационная станция для управления посадкой космического аппарата на поверхность Луны. М.: ИП Радиософт, 2016. 200 с.
4. Боков А.С. и др. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств // Надежность и качество сложных систем, 2019, № 3 (27). С. 33–48.
5. Калабин А.Л., Морозов А.К. Метод испытания радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового оборудования // Программные продукты и системы, 2022, т. 35, № 3. С. 438–443.
6. Федорук В.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1990. 328 с.
7. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учебник. 13-е изд., испр. СПб: Лань, 2015. 448 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.12.2024

Дата принятия рукописи
в печать 23.02.2025