

СПУТНИКОВЫЙ ДАЛЬНОМЕР С ПАССИВНЫМ РЕТРООТРАЖЕНИЕМ ЗАПРОСНОГО РАДИОСИГНАЛА

**В. Е. Чеботарев^{1,2}✉, Ю. П. Саломатов², В. С. Панько²,
А. А. Ерохин², Е. В. Кузьмин², Р. О. Рязанцев²**

¹ АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железнодорожный, Московская область, Российская Федерация

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

В перспективных проектах лунной информационно-навигационной обеспечивающей системы рассматривается использование спутникового дальномера для решения задачи баллистического обеспечения окололунных космических аппаратов. В настоящей работе рассмотрена математическая модель расчета радиолинии спутникового дальномера с пассивным ретроотражением запросного радиосигнала от селенодизических пунктов. Модель позволяет выполнить расчет отношения «сигнал-шум» в отраженном радиосигнале и среднеквадратическое отклонение определения дальности от космического аппарата до пассивного ретрорадиоотражателя при различных условиях. В расчетах учитывается как отражение сигнала от ретрорадиоотражателя, так и от окружающего поверхностного лунного грунта. Рассмотрены различные типы ретрорадиоотражателя в виде комбинаций уголкового отражателя и в виде линзы Люнебурга. Выполнены расчеты радиолинии с использованием указанных типов ретрорадиоотражателей для разных значений высоты орбиты, частоты сигнала и других параметров. Показано, что при определенных значениях параметров радиолинии достигается значение среднеквадратического отклонения определения дальности порядка единиц метров и меньше как для линзы Люнебурга, так и для комбинированного уголкового отражателя. Окончательный выбор должен быть сделан с учетом их массы, а также возможностей трансформации ретрорадиоотражателя из транспортного в рабочее состояние.

Ключевые слова: космический аппарат, пассивный ретрорадиоотражатель, селенодизический пункт, дальномер, линза Люнебурга, уголкового отражатель.

Введение

В перспективных планах исследования и промышленного освоения Луны предусматривается создание на постоянной основе лунной информационно-навигационной обеспечивающей системы (ЛИНОС) длительного функционирования для обеспечения связи и навигацией мобильных транспортных средств на поверхности Луны и вблизи нее [1; 10].

Развертывание окололунной орбитальной группировки космических аппаратов (КА) ЛИНОС связано с необходимостью упреждающего размещения на поверхности Луны средств автоматического контура управления и баллисти-

ческого обеспечения и, в первую очередь, размещения триангуляционной селенодизической сети пунктов (СДП) для баллистического обеспечения окололунной спутниковой группировки.

Триангуляционная селенодизическая сеть пунктов должна создаваться исходя из условия ее длительного использования в составе ЛИНОС [1; 10]. Поэтому СДП должны быть автономными, необслуживаемыми и иметь длительный срок эксплуатации. Этому принципу наиболее полно удовлетворяют СДП, оборудованные пассивными ретрорадиоотражателями запросных сигналов с КА ЛИНОС.

В данной статье исследованы вопросы реализации запросной схемы радиоизмерений дальности с использованием спутникового радиолокатора (СРЛ) и пассивных радиоотражателей (ПРО) из состава СДП, размещаемых на поверхности Луны.

✉ chebotarev@iss-reshetnev.ru

© Чеботарев В. Е., Саломатов Ю. П., Панько В. С., Ерохин А. А., Кузьмин Е. В., Рязанцев Р. О., 2019

Проведено математическое моделирование отражения радиолокационного сигнала от ПРО и поверхности Луны с учетом свойств лунного грунта для различных высот орбит КА ЛИНОС.

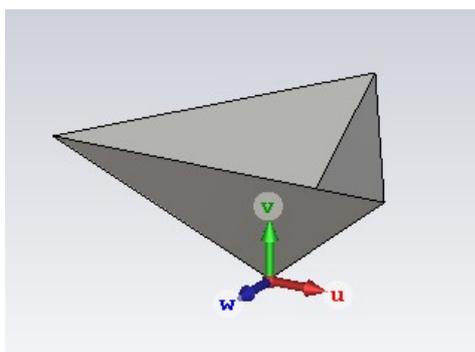
1. Моностатические пассивные радиоотражатели

Рассмотрены различные варианты моностатических ПРО, обладающих свойством отражения в направлении прихода волны (ретроотражение) в верхней полусфере [2]:

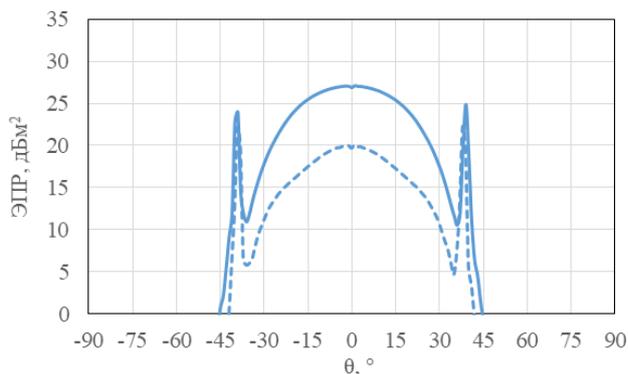
- трехгранный уголковый отражатель (УО) и комбинации из нескольких УО;
- сферическая линза Люнебурга с отражателем.

Проведено моделирование эффективной площади рассеивания (ЭПР) и моностатической индикатрисы рассеяния (МИР), представляющей зависимость ЭПР от угла облучения θ .

На рис. 1–4 приведены результаты моделирования для случая: частота зондирующего радиосигнала равна 15 ГГц, площадь проекции ПРО вдоль вертикальной оси ($\theta = 0$) равна 0,196 м².

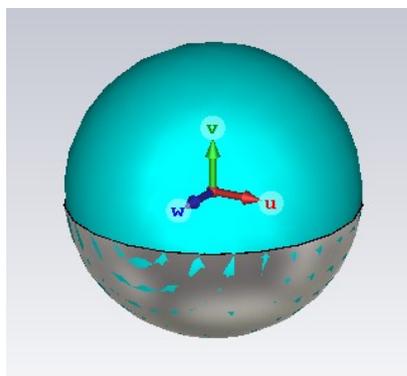


а

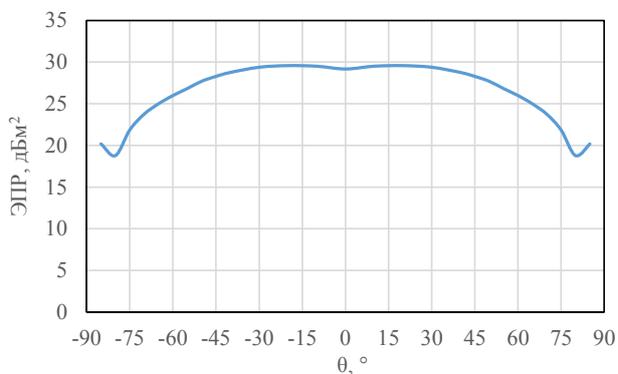


б

Рис. 1. Модель (а) и рассчитанная МИР (б) трехгранного уголкового отражателя (сплошная линия – угол между гранями 90°, штриховая линия – угол между гранями 91°)

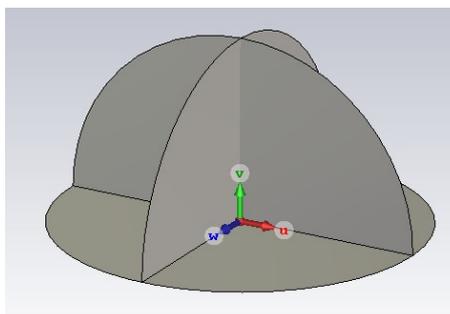


а

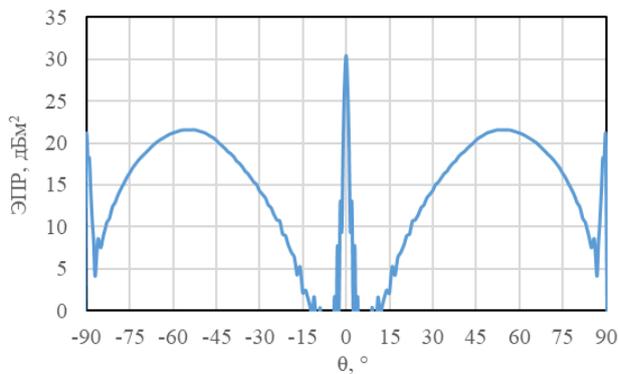


б

Рис. 2. Модель (а) и рассчитанная МИР (б) линзы Люнебурга с экраном

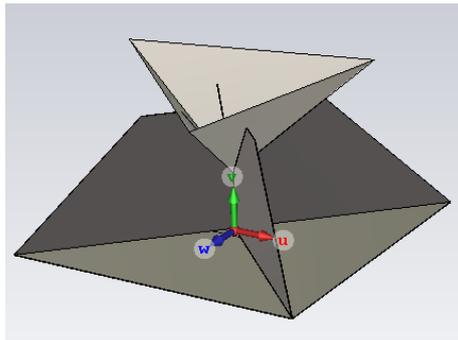


а

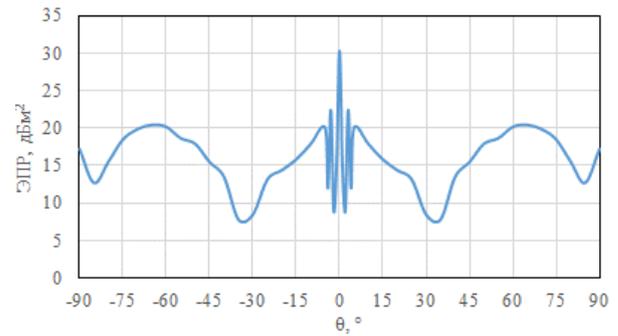


б

Рис. 3. Модель (а) и рассчитанная МИР (б) комбинации из 4 уголковых отражателей



а



б

Рис. 4. Модель (а) и рассчитанная МИР (б) комбинации из 4 угольковых отражателей с дополнительным центральным отражателем

Как видно из рис. 1, необходима точная реализация углового положения граней.

По равномерности МИР и максимальной величине ЭПР линза Люнебурга с экраном имеет преимущества (стабильно высокая ЭПР в широком секторе углов падения электромагнитной волны). Конструктивно линза Люнебурга сферического типа может быть изготовлена в виде коаксиального набора параллельных круглых осесимметричных диэлектрических элементов переменной толщины, в котором каждый из элементов также симметричен относительно плоскости, перпендикулярной оси, а диаметр, толщина элементов и, соответственно, распределение эффективной диэлектрической проницаемости взаимосвязаны [3].

Проведена оценка массы $m_{лю}$ линзы Люнебурга без механизмов раскрытия для различных значений параметров (табл. 1).

Таблица 1

Конструктивные параметры линзы Люнебурга

№	Плотность материала ρ_m , кг/дм ³	Коэффициент заполнения a_i	Диаметр $D_{лю}$, м	Масса $m_{лю}$, кг
1	1,99	0,197	2	1644
2	1,99	0,197	1	206
3	1,99	0,197	0,5	26
4	1,99	0,197	0,4	13

Как видно из табл. 1, для сохранения приемлемой массы (с механизмами раскрытия) размер линзы Люнебурга должен быть небольшим – диаметр менее 0,5 м, что соответствует площади 0,196 м².

Далее были проведены исследования в направлении создания комбинированного УО. В целях исключения провала диаграммы ПРО из 4-х УО (рис. 3) в секторе углов, близких к нормальному, рассмотрена комбинация из 4 УО и одним сверху. На рис. 4 показаны результаты расчета МИР для комбинации УО с соотношением сторон угольков 1,25. Как видно из рис. 4, диаграмма в зоне углов падения около $\pm 60^\circ$ заметно улучшилась по сравнению с 4-элементным УО, однако при таком

соотношении размеров УО не обеспечивается равномерная ЭПР.

Результаты поиска оптимального соотношения размеров угольков позволили сформулировать рекомендацию: равномерная характеристика диаграммы МИР наблюдается при приблизительном равенстве длин ребер нижних и верхнего УО (рис. 5).

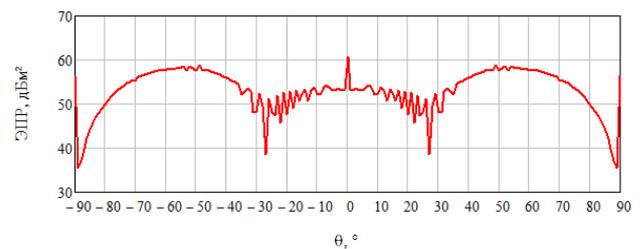


Рис. 5. МИР оптимального комбинированного уголькового ПРО с размером ребра нижнего уголка $a = 1,7$ м и верхнего уголка $b = 1,62$ м

2. Математическая модель радиолокационного канала с ПРО

Одной из центральных задач при выборе технического облика радиолокатора является разработка математической модели радиолокационного канала, которая должна обеспечить выбор частотного диапазона, полосы рабочих частот, поляризации и типа зондирующего сигнала спутникового радиолокатора при различных условиях, таких, как высота орбиты КА, угол облучения лунной поверхности и ширина диаграммы направленности (ДН) используемой антенны.

Описанная математическая модель была разработана и реализована в виде файла в среде MathCad. Она позволяет выполнять анализ типовых локационных импульсных радиосигналов (радиоимпульс, импульс с фазокодовой манипуляцией (ФКМ), импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [4; 5]) с использованием зависимостей средних и среднеквадратических значений ошибок измерения дальности (СКО) от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) [6].

С помощью модели проведена серия вычислительных статистических экспериментов. При определении ОСШ учитывалось отражение сигнала как от ПРО на поверхности Луны, так и от окружающего лунного грунта [7] с учетом его электрофизических свойств [8; 9].

Результаты статистического вычислительного эксперимента по определению точности временного положения радиоимпульса на фоне шума (СКО) для типовых радиосигналов (длительность радиоимпульсов 6,2 мкс) показаны на рис. 6. Пунктирной линией показана зависимость, соответствующая радиоимпульсу, сплошной линией – ФКМ-радиоимпульсу, круглыми символами – ЛЧМ-радиоимпульсу.

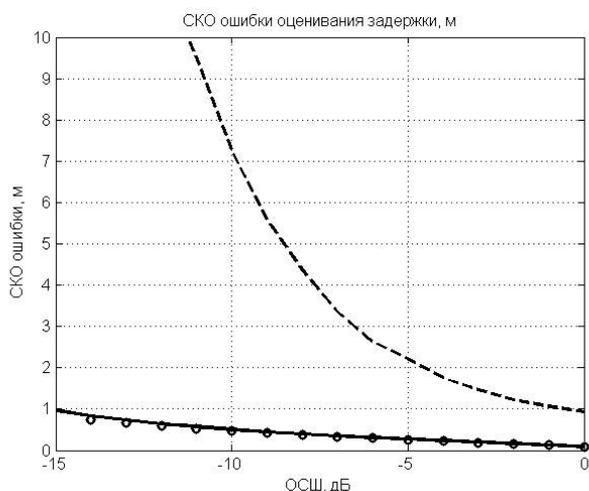


Рис. 6. Зависимость среднев квадратических значений ошибок измерения дальности от отношения «сигнал/шум»

Как видно из рис. 6, при использовании СКО в качестве основного показателя качества работы импульсного СРЛ, предпочтение следует отдать радиоимпульсам с внутримпульсной модуляцией: ФКМ-импульсу, ЛЧМ-импульсу.

Проведены расчеты зависимости среднев квадратических значений ошибок измерения временного положения сигнального всплеска от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) для различных значений длины полинома N псевдослучайной последовательности (ПСП) и длительности радиоимпульса t .

В табл. 2 представлена информация о величине ОСШ, обеспечивающая СКО в пределах 1 м в зависимости от N и t .

Таблица 2

Зависимости ОСШ от длительности радиоимпульса

N	6	127	255	511	1023	2047	4094
t , мкс	6,2	12,4	25	50	104	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
ОСШ, дБ	-15	-18	-20	-24	-27	-30	-33

Как видно из табл. 2, при увеличении длины ПСП снижаются требования к необходимому отношению «сигнал/шум», при котором обеспечивается одинаковое (к примеру, 1,0 м) значение СКО измерения дальности. Однако при фиксированной полосе частот, а значит (при фиксированной тактовой частоте генератора кодирующей последовательности) при фиксированной длительности кодирующей последовательности, увеличение длины кодирующей последовательности может быть невозможным по причине существенного увеличения длительности зондирующего радиоимпульса.

Допустимые значения длины импульса t_u и паузы t_n приведены в табл. 3. Там же помещены допустимые значения N и ОСШ из табл. 2. Полученные данные были использованы для выбора параметров радиолинии и СРЛ.

Таблица 3

Характеристики радиоимпульсов

Высота, км	200	800	2762
Радиус, км	1938	2538	4500
Дальность, км	857	1850	4155
t_u , мс	1,3	5,3	18,4
t_n , мс	2,9	12,3	27,7
N	511	511	1023
ОСШ, дБ	-24	-24	-27

3. Исследования параметров радиолинии с ПРО

С помощью модели, описанной в разделе 2, проведено моделирование радиолинии для различных условий: высота орбиты h , угол облучения ПРО спутником θ_0 , рабочая частота f , длина полинома ПСП N . Ширина ДН антенны СРЛ принята $2\theta_{0,5} = 0,5^\circ$, излучаемая мощность $P = 50$ Вт.

Полученные зависимости СКО измерения дальности от различных параметров для линзы Лüneбурга диаметром 0,5 м приведены на рис. 7–9. Длина ПСП здесь и в дальнейших расчетах задается равной $N = 511$ для высоты орбиты менее 800 км, и $N = 1023$ для большей высоты, в связи с чем на графике рис. 7 присутствует скачок в значении СКО.

Как видно из рис. 7–9, линза Лüneбурга диаметром 0,5 м применима при высоких частотах ($f = 27$ ГГц) и низких орбитах (менее 800 км), а требуемая мощность передатчика практически не зависит от высоты.

Далее приведены зависимости СКО измерения дальности от различных параметров для комбинированных уголкового ПРО с оптимальным

соотношением ребер: нижнего уголка $a = 1,7$ м и верхнего уголка $b = 1,62$ м (рис. 10 и 11). Для достижения требуемой СКО потребовалось уменьшить ширину ДН антенны СРЛ до значения $0,5^\circ$ и $0,13^\circ$.

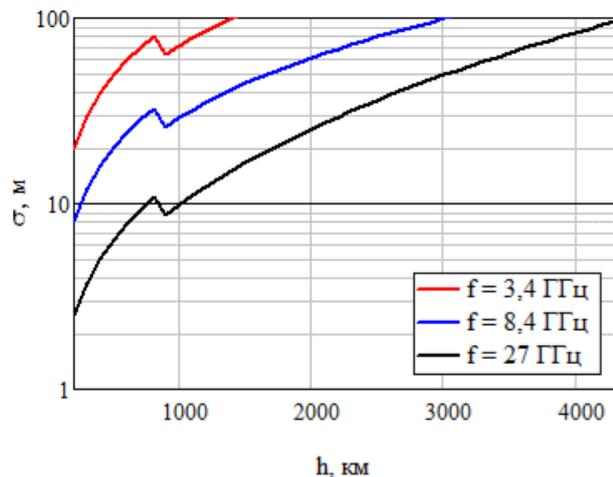


Рис. 7. СКО от высоты орбиты при разных частотах, угол облучения $\theta_0 = 10^\circ$

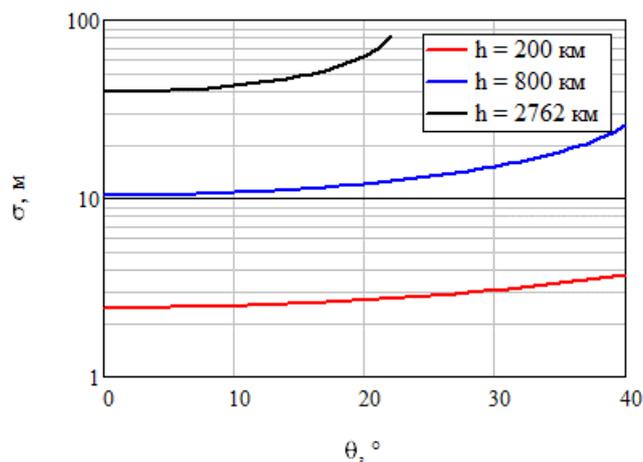


Рис. 8. СКО в зависимости от угла облучения θ_0 при разных орбитах, частота $f = 27$ ГГц

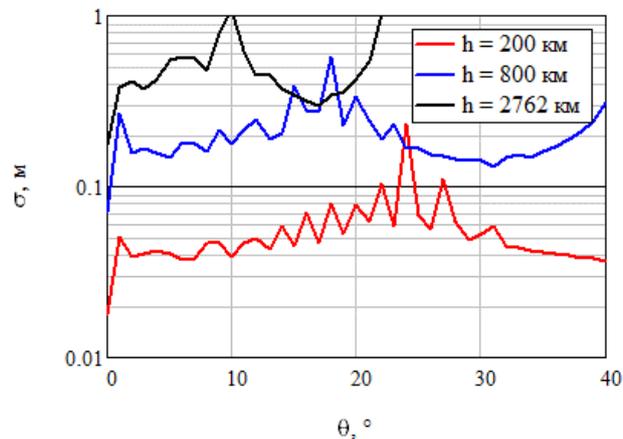


Рис. 9. Зависимость СКО от мощности передатчика при разной высоте орбиты для диаметра линзы $0,5$ м и частоты $f = 27$ ГГц

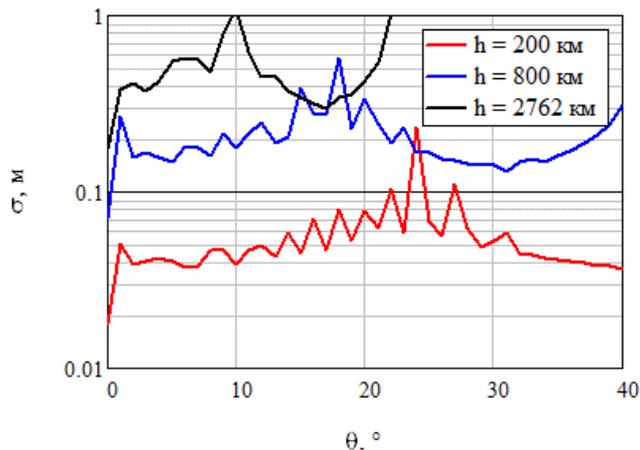


Рис. 10. СКО в зависимости от угла облучения при разных орбитах. Комбинированный уголкового ПРО ($a = 1,7$ м, $b = 1,62$ м, $f = 27$ ГГц, $2\theta_{0,5} = 0,2^\circ$)

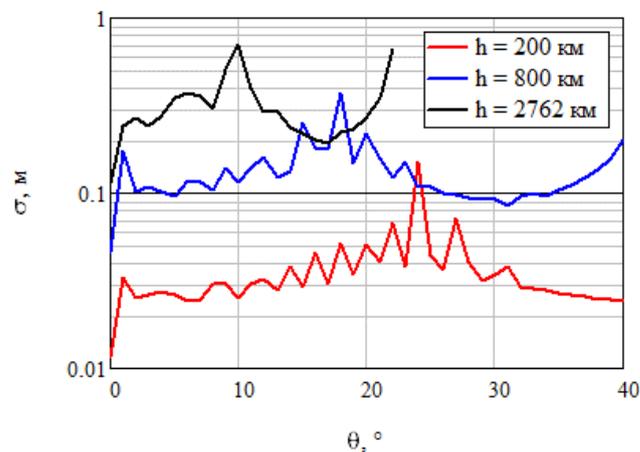


Рис. 11. СКО в зависимости от угла облучения при разных орбитах. Комбинированный уголкового ПРО ($a = 1,7$ м, $b = 1,62$ м, $f = 27$ ГГц, $2\theta_{0,5} = 0,13^\circ$)

4. Выбор параметров спутникового локатора

Для обеспечения СКО измерения дальности порядка единиц метров для рассматриваемых орбит сформулированы обобщенные характеристики измерительной радиолинии с ПРО (табл. 4).

Таблица 4

Обобщенные характеристики измерительной радиолинии с ПРО

Высота орбиты h , км	200	800	2760
Ширина ДН антенны СРЛ $\Delta\theta_{0,5}$, $^\circ$	0,5	0,2	0,13
Частота радиосигнала f , ГГц	27	27	27
Мощность радиосигнала P , Вт	50	50	50
Длительность пакета импульсов, мс	1,3	5,3	18,4
Длина полинома ПСП N	511	511	1023

Продолжение табл. 4

Диаметр антенны СРЛ, м	1,3	3,3	5,0
СКО измерения дальности σ для угла облучения $\theta_0 = 10^\circ$, м • уголкового ПРО, размер ребра 1,7/1,6 м • линзы Люнебурга, диаметр 0,5 м	0,1	0,2	0,7
	2,5	4,0	6,7
Рабочая зона обзора ПРО (углы падения), ° • уголкового ПРО • линзы Люнебурга	$\pm 80^\circ$ $\pm 90^\circ$	$\pm 80^\circ$ $\pm 90^\circ$	$\pm 80^\circ$ $\pm 90^\circ$

Заключение

Приведенные результаты показывают, что в рамках предложенной в [1; 10] концепции возможно достижение СКО определения дальности менее 1 м на достаточно низких орбитах и при использовании сравнительно узкой ДН антенны СРЛ.

В качестве ПРО могут быть выбраны как линза Люнебурга, так и комбинированный уголкового отражатель, окончательный выбор должен быть сделан с учетом массы ПРО, а также возможностей трансформации ПРО из транспортировочного в рабочее состояние.

Полученные результаты использованы при проектировании ЛИНОС в рамках СЧ НИР «Вызов-Перспектива 5».

Список литературы

- [1] Чеботарев В. Е., Звонарь В. Д., Грицан О. Б., Внуков А. А. Концепция построения триангуляционной селенодезической сети // Исследования наукограда. №2(8). 2014. С. 4–9.
- [2] Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио, 1975. 248 с.
- [3] Рязанцев Р. О., Саломатов Ю. П. Устройство для фокусировки типа «Линза Люнебурга». Пат. № 2485646, Российская Федерация, 2013, бюл. № 17.
- [4] Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника; В 2 кн. Кн. 2. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
- [5] Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- [6] Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
- [7] Смирнов В. М., Юшкова О. В., Марчук В. Н., Дутышев И. Н., Чернышев Б. В., Лаптев М. А. Исследование поверхности и строения грунта Луны многоцелевым радиофизическим комплексом РЛК-Л в проекте «Луна-Ресурс» // Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы VII Всерос. научной конференции. Муром. 2017. С. 124–128.
- [8] Слюта Е. Н. Физико-механические свойства лунного грунта (Обзор) // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
- [9] Юшкова О. В., Кибардина И. Н., Исаева Л. П. Особенности отражения радиоволн от слоя реголита // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: материалы Всероссийской научной конференции. Муром. 2015. С. 22–25.
- [10] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е. Лунная информационно-навигационная обеспечивающая система / Актуальные вопросы проектирования АКА для фундаментальных и прикладных научных исследований. Химки, ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», 2015. С. 323–329.

THE SATELLITE DISTANCE RADIOMETER WITH A PASSIVE RETROREFLECTION OF A REQUEST RADIO SIGNAL

V. E. Chebotarev^{1,2}, Yu. P. Salomatov², V. S. Panko²,
A. A. Erokhin², E. V. Kuzmin², R. O. Ryazantsev²

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

In prospect projects of the lunar information and navigation support system, the using of a satellite range finder for solving the problem of ballistic support of near-moon spacecrafts is

considered. In this paper we consider a mathematical model for calculating the radio line of a satellite rangefinder with passive retro reflection of the requested radio signal from selenodesic points. The model allows the calculation of the signal-to-noise ratio in the reflected radio signal and the standard deviation of the determination of the distance from the spacecraft to the passive radio retroreflector under various conditions. The calculations take into account both the reflection of the signal from the radio retroreflector and from the surrounding surface lunar soil. Various types of radio retroreflectors in the form of combinations of corner reflectors and in the form of a Luneburg lens are considered. The calculations of the radio line using the indicated types of retro radio reflectors for different values of the orbit height, signal frequency and other parameters are performed. It is shown that, at certain values of the parameters of the radio line, the standard deviation of the determination of the range of the order of units of meters and less is achieved both for the Luneburg lens and the combined angular reflector. The final choice should be made taking into account their mass, as well as the possibilities of transforming the radio retroreflector from transportation to working condition.

Keywords: spacecraft, passive radio retroreflector, selenodesic point, distance meter, Luneburg lens, corner reflector.

References

- [1] 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.
- [2] Kobak V. O. *Radiolokacionnye otrazhateli* [Radar reflectors]. Moscow, Soviet Radio, 1975. 248 p. (In Russian)
- [3] Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P. *Ustrojstvo dlya fokusirovki tipa «Linza Lyuneberga»* [Device for focusing of the Luneberg lens type]. Patent RU 2485646, 2013, bulletin no. 17. (In Russian)
- [4] Skolnik M. I. *Spravochnik po radiolokacii* [Handbook of Radar]. Moscow, Technosphere, 2014. 680 p. (In Russian)
- [5] Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Radar-tracking systems for space-based land survey]. Moscow, Radio Engineering, 2010. 680 p. (In Russian)
- [6] Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radio-location information against a background of interference]. Moscow, Radio and communication, 1981. 416 p. (In Russian)
- [7] Smirnov V. M., Yushkova O. V., Marchuk V. N., Dutsyshev I. N., Chernyshev B. V., Laptev M. A. *Issledovanie poverhnosti i stroeniya grunta Luny mnogocel'evym radiofizicheskim kompleksom RLK-L v proekte «Luna-Resurs»* [Study of the surface and soil structure of the moon by the multi-purpose radio-physical complex RLK-L in the project «Luna-Resource»] // *Vserossijskie Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya, radiolokacii, rasprostraneniya i difrakcii voln* [All-Russian Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction]: proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference. Murum, 2017, pp. 124–128. (In Russian)
- [8] Slyuta E. N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva lunnogo grunta (Obzor)* [Physical and mechanical properties of lunar soil (Review)] // *Astronomical Bulletin*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 358–382. (In Russian)
- [9] Yushkova O. V., Kibardina I. N., Isaeva L. P. *Osobennosti otrazheniya radiovoln ot sloya regolita* [Features of the reflection of radio waves from the regolith layer] // *Sverhshirokopolosnye signaly v radiolokacii, svyazi i akustike* [Ultra-wideband signals in radiolocation, communication and acoustics]: materials of the All-Russian Scientific Conference. Murom, 2015, pp. 22–25. (In Russian)
- [10] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. *Lunnaya informacionno-navigacionnaya obespechivayushchaya sistema* [Lunar information and navigation support system] / *Aktual'nye voprosy proektirovaniya AKA dlya fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij* [Actual problems of AKA design for fundamental and applied scientific research]. Khimki, FSUE «S. A. Lavochkina», 2015, pp. 323–329. (In Russian)