

Научная статья

УДК 629.787:621.396

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186889>

EDN: <https://www.elibrary.ru/KOHDST>

ПРИМЕНЕНИЕ БОРТОВОГО РАДИОЛОКАТОРА И УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ПОСАДКИ В ВЫБРАННОМ РАЙОНЕ ЛУНЫ

Л.В. Вернигора[✉], П.В. Казмерчук

Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина",
Московская обл., г. Химки, Россия

✉ VernigoraLV@laspace.ru

Цитирование: Вернигора Л.В., Казмерчук П.В. Применение бортового радиолокатора и уголкового отражателя для обеспечения высокоточной посадки в выбранном районе Луны // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186889>

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения системы, состоящей из бортового радиолокатора и уголкового отражателя, для обеспечения высокоточной посадки в выбранном районе Луны. Представлена одна из возможных схем посадки космического аппарата на поверхность Луны. В соответствии со схемой предложено применение бортового радиолокатора со спиральным сканированием подстилающей поверхности Луны, установленного на поворотной платформе для обеспечения наведения излучения на уголкового отражателя, предварительно размещенный в точке предполагаемой посадки. Полученные измерения положения уголкового отражателя относительно бортовой системы координат могут быть использованы для корректировки навигационной задачи системы управления космическим аппаратом на участке основного торможения. Определена максимальная дальность обнаружения подстилающей поверхности в зависимости от угла облучения, а также максимальная дальность обнаружения уголкового отражателя в зависимости от размера граней для заданных параметров приемо-передающей системы.

Проведены расчеты энергетических параметров сигнала для обеспечения требуемой наклонной дальности обнаружения углового отражателя. Проведена оценка точности определения координат углового отражателя относительно бортовой системы координат. Полученные результаты показали принципиальную возможность применения бортового сканирующего радиолокатора и углового отражателя для обеспечения высокоточной посадки в выбранном районе Луны.

Ключевые слова: Луна, бортовой радиолокатор, угловой отражатель, высокоточная посадка.

USE OF ONBOARD RADAR AND CORNER REFLECTORS TO ENSURE A HIGH-PRECISION LANDING IN THE SELECTED AREA OF THE MOON

L.V. Vernigora[✉], P.V. Kazmerchuk

Joint Stock Company "NPO Lavochkin", Khimki, Moscow Region, Russia

✉ VernigoraLV@laspace.ru

Citation: Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V. Use of onboard radar and corner reflectors to ensure a high-precision landing in the selected area of the Moon // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186889>

Abstract. The article considers the possibility of using a system consisting of an onboard radar and a corner reflector to ensure a high-precision landing in a selected area of the Moon. One of the possible landing schemes for a spacecraft on the Moon's surface is presented. According to the scheme, an onboard radar with a spiral scan of the Moon's surface, mounted on a rotating platform, is proposed to guide the radiation towards a corner reflector that has been placed at the intended landing point. The obtained measurements of the position of the corner reflector relative to the onboard coordinate system can be used to adjust the navigation task of the spacecraft control system during the main braking phase. The maximum detection range of the underlying surface has been determined, depending on the irradiation angle, as well as the maximum detection range of the corner reflector, depending on the size of the facets, for the specified parameters of the transceiver system. Calculations of the energy parameters of the signal

were carried out to ensure the required oblique range of detection of the corner reflector. The accuracy of determining the coordinates of the corner reflector relative to the onboard coordinate system was estimated. The results obtained showed the fundamental possibility of using an onboard scanning radar and a corner reflector to ensure a high-precision landing in the selected area of the Moon.

Keywords: Moon, on-board radar, corner reflector, high-precision landing.

Введение

В настоящее время в рамках российско-китайского сотрудничества планируется создание международной научной лунной станции (МНЛС). МНЛС - комплекс экспериментально-исследовательских средств, создаваемый на поверхности и/или на орбите вокруг Луны с возможным привлечением других стран, международных организаций и других международных партнеров. Предназначен для проведения многопрофильных и многоцелевых научно-исследовательских работ, включая исследование и использование Луны, лунные наблюдения, фундаментальные исследовательские эксперименты и проверку технологий, с возможностью длительной беспилотной эксплуатации и перспективой обеспечения присутствия человека [1].

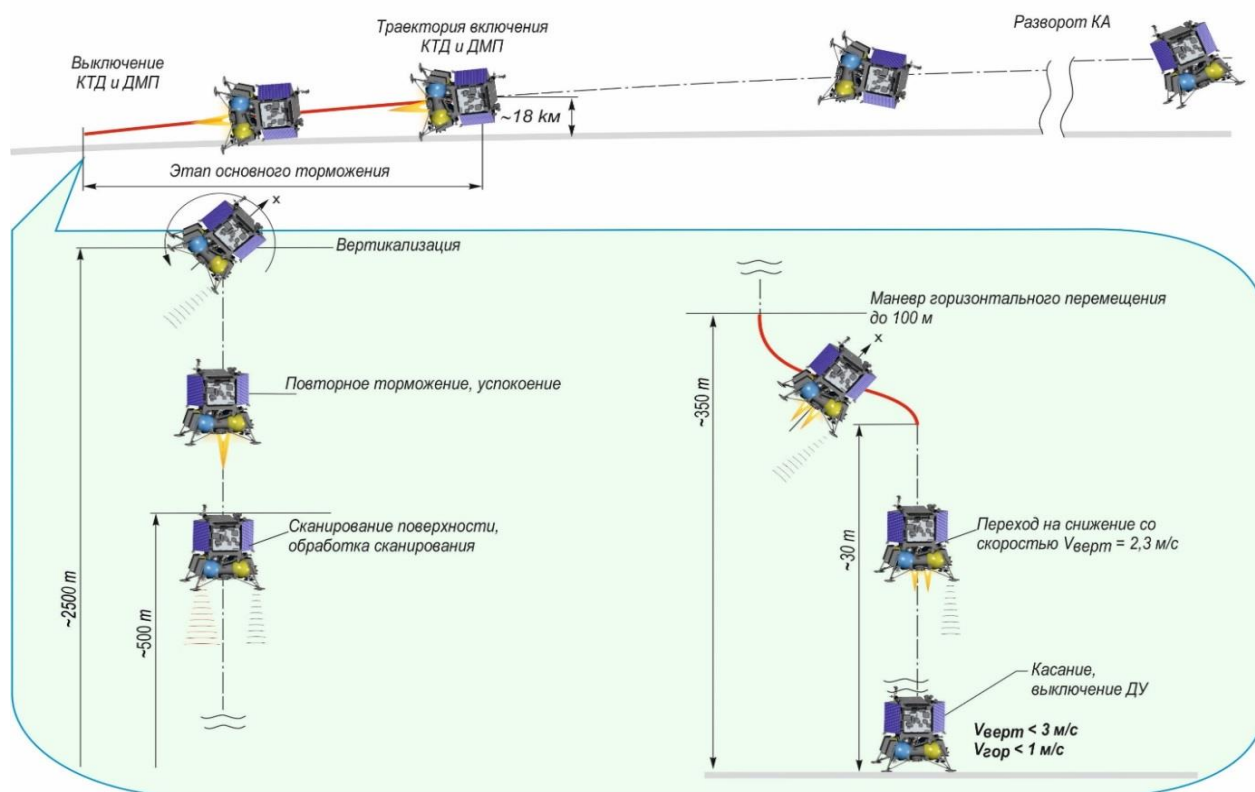
Строительство МНЛС запланировано в районе Южного полюса Луны. При этом, для реализации проекта МНЛС потребуются решение задачи обеспечения высокоточной посадки аппаратов на поверхность Луны в непосредственной близости друг от друга. Однако, посадка на Южном полюсе Луны является сложной задачей из-за наличия опасных элементов рельефа, необходимости учета условий освещенности и радиосвязи. Эти обстоятельства требуют применение новых подходов в навигации [2, 3].

Целью работы является анализ возможности применения системы, состоящей из бортового радиолокатора и уголкового отражателя (УО), для повышения точности посадки в выбранном районе Луны.

Система из бортового радиолокатора и уголкового отражателя для обеспечения высокоточной посадки

В соответствии с одной из возможных схем посадки [4] перед прилунением космический аппарат (КА) несколько суток находится на околокруговой орбите с высотой порядка 100 км, далее переводится на предпосадочную эллиптическую орбиту $\sim 100 \times 18$ км, затем проводится маневр основного торможения для гашения орбитальной скорости и прецизионное торможение для устранения ошибок предыдущего маневра. На заключительных этапах посадки выполняется сканирование рельефа с целью определения безопасных участков поверхности и горизонтальный маневр для увода КА в безопасную область при необходимости.

Схема посадки КА на поверхность Луны представлена на рисунке 1.



С учетом различных ошибок системы управления, точности знания и прогноза параметров орбиты на момент начала основного торможения и других неопределенностей, указанная схема позволяет осуществить посадку в выбранный район с точностью в несколько километров. По предварительным оценкам при разворачивании МНЛС необходимо обеспечить точность посадки порядка 100 м.

Для повышения точности посадки необходимо решить задачу высокоточного определения координат КА относительно точки посадки на этапе основного торможения. В данной работе рассмотрена возможность использования для решения этой задачи системы из радиолокационного сканирующего устройства, входящего в состав бортового комплекса управления КА и углового отражателя, предварительно размещенного в точке предполагаемой посадки.

Сканирующее устройство представляет собой сканер лунной поверхности на базе малогабаритного радиолокатора с электромеханическим сканированием подстилающей поверхности Луны в конусе $\alpha = \pm 20^\circ$, траектория сканирования – раскручивающаяся от центра спираль. Для наведения излучения на УО на этапе основного торможения бортовой радиолокатор должен быть установлен на поворотную платформу с возможностью отклонения $\varepsilon = \pm 50^\circ$.

Расположение сканирующего луча относительно приборной системы координат бортового радиолокатора представлено на рисунке 2.

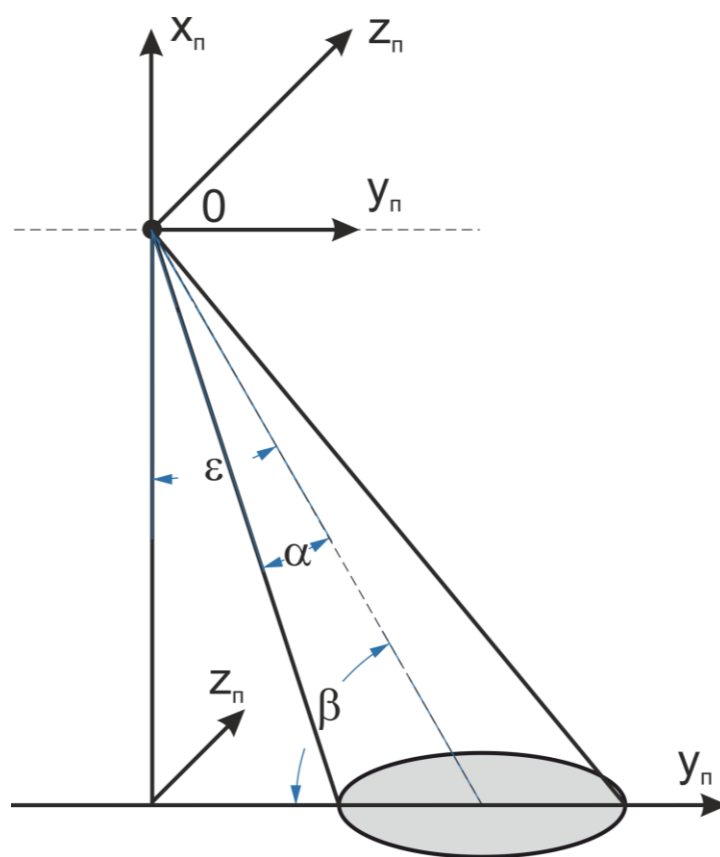


Рисунок 2 - Расположение сканирующего луча относительно приборной системы координат бортового радиолокатора.

Спиральный обзор пространства представляет комбинацию вращения диаграммы направленности с одновременным изменением угла между осью вращения и осью диаграммы направленности (Ω).

На рисунке 3 приведена иллюстрация спирального сканирования антенной.

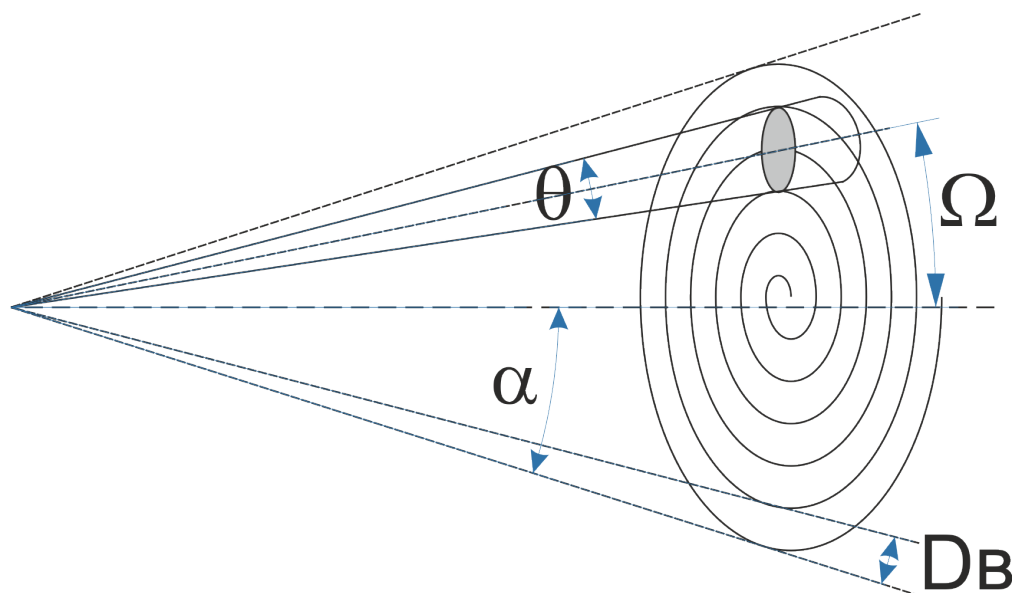


Рисунок 3 - Спиральное сканирование.

Для того чтобы в просматриваемом пространстве не было пропусков целей шаг спирали D_B не должен превышать половину ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) $0,5 \cdot \theta_{0,5}$.

Дальность обнаружения подстилающей поверхности и углового отражателя

Дальность до цели $r_{ц}$ измеряется по времени задержки t_3 принятого сигнала относительно известного времени его излучения [5]:

$$r_{ц} = \frac{t_3 c}{2}, \quad (1)$$

где c - скорость распространения радиоволн в вакууме, $c=3 \cdot 10^8$ м/с.

Максимальную дальность обнаружения цели можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$r_{\text{пп}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}} \cdot L}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{и}}$ – импульсная мощность передатчика; G – коэффициент усиления приемопередающей антенны; λ – длина волны излученного сигнала; $\sigma_{\text{пп}}$ – эффективная площадь рассеивания (ЭПР) цели; $P_{\text{пор}}$ – пороговая чувствительность приемника; L – затухание сигнала в фидерном тракте и обтекателе.

Из (2) следует что одним из параметров, влияющих на дальность обнаружения цели, является ЭПР.

ЭПР участка подстилающей поверхности, подсвеченной ДНА, рассчитывается по формуле [6].

$$\sigma_{\text{пп}} = \sigma_0 \cdot ds = \sigma_0 \cdot r \cdot \theta \cdot \frac{dr}{\cos \beta}, \quad (3)$$

где σ_0 – удельная ЭПР подстилающей поверхности; ds – элемент поверхностного разрешения радиолокатора; r – расстояние до подстилающей поверхности; θ – ширина ДНА; dr – разрешающая способность по дальности; β – угол, определяющий ориентацию луча излучающей системы в осях приборной системы координат.

Для дальнейшего расчета принимаются следующие значения удельной ЭПР подстилающей поверхности в зависимости от угла падения (таблица 1) [7].

Таблица 1

Удельная ЭПР подстилающей поверхности Луны

Угол падения	0°	10°	20°	30°	40°	50°
УПР, дБ м ² /м ²	-7,0	-9,0	-11,0	-15,0	-16,0	-17,0

Уголковые отражатели обычно представляют собой конструкцию из двух или трех перпендикулярных плоскостей, которые называются гранями и могут иметь различные размеры и форму. Чаще всего применяются отражатели с треугольными и квадратными гранями. Главной особенностью УО треугольной формы является то, что значительная доля энергии волны, падающей на него с

любого направления в пределах достаточно большого угла (около 80°), отражается обратно в сторону облучающей радиолокационной системы (РЛС). Поэтому даже при небольших размерах треугольные отражатели имеют значительную ЭПР, которую можно вычислить по формуле [8]:

$$\sigma_{yo} = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}, \quad (4)$$

где λ – длина волны радиолокатора; a – длина внутреннего ребра.

В частности, ЭПР одного трехгранного УО с размерами граней $a=0,5$ м и длиной волны РЛС $\lambda=3,2$ мм составляет величину $\sigma_{yo}=25\,566$ м².

Для увеличения сектора переизлучения применяются несколько отражателей, соединенных между собой и по-разному ориентированных в пространстве (рисунок 4).



Рисунок 4 - Комбинированный многосекторный УО.

Для оценки максимальной дальности обнаружения подстилающей поверхности и УО бортовым радиолокатором примем следующие исходные данные: $P_{и}=0,7$ Вт, $dr=2,4$ м, $G=41,5$ дБ, $\lambda=3,2 \cdot 10^{-3}$ м, $P_{пор}=-110$ дБВт, $L=1,4$ дБ, значения ЭПР подстилающей поверхности берутся из таблицы 1.

Подставив данные в формулу (2), при значении $\sigma_{ц}=\sigma_{пп}$ для подстилающей поверхности и $\sigma_{ц}=\sigma_{yo}$ для УО, получим значения максимальной дальности

обнаружения подстилающей поверхности в зависимости от угла облучения и максимальной дальности обнаружения УО в зависимости от размера граней УО, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Максимальная дальность обнаружения подстилающей поверхности в зависимости от угла облучения и УО в зависимости от размера граней УО

Обнаружение подстилающей поверхности		Обнаружение УО	
Угол β , гр.	Максимальная дальность обнаружения подстилающей поверхности, м	Размер граней УО, м	Максимальная дальность обнаружения УО, м
40	408	0,05	604
50	440	0,10	1209
60	517	0,3	3626
70	797	0,5	6044
80	1164	0,7	8461
90	1578	1	12087

Основное торможение начинается за $\sim 8^\circ$ до предполагаемого места посадки, что соответствует дальности порядка 250 км на подстилающей поверхности Луны. Исходя из результатов расчета (таблица 2), для обеспечения обнаружения бортовым радиолокатором УО на расстоянии 250 км потребуются дополнительные меры, направленные на улучшение характеристик приемо-передающей системы.

Из уравнения (2) следует, что максимальная дальность действия бортового радиолокатора пропорциональна корню четвертой степени из мощности излучаемого сигнала. Например, при увеличении мощности излучаемого сигнала в 16 раз дальность обнаружения цели возрастает всего в 2 раза.

Увеличение дальности действия системы можно достичь за счёт согласованной фильтрации с фазово-кодовой манипуляцией (ФКМ) и когерентного накопления пачки импульсов. Данные методы позволяют улучшить разрешающую способность по дальности и повысить отношение сигнал/шум, что влияет на дальность действия радиолокатора.

Согласованный фильтр обеспечивает сжатие импульса, увеличивая пиковую мощность и уменьшая его длительность. Это позволяет достичь одновременно большой энергии излучения, свойственной длинному зондирующему импульсу, и высокого разрешения целей по дальности, свойственного короткому сжатому сигналу [9]. Коэффициент сжатия импульса M численно равен количеству отдельных частей зондирующего сигнала, также называемых парциальными импульсами, то есть количеству элементов в коде, которое может достигать $10^2 \dots 10^3$ [10].

В случае приема N импульсов на фоне подстилающей поверхности характеристики качества обнаружения оказываются такими же что и при приеме одного импульса, но имеющего в N раз большую энергию. Энергия сигнала при этом будет пропорциональна мощности передатчика, умноженной на длительность импульса. В случае пачки импульсов общая длительность сигнала возрастет в N раз, соответственно в N раз увеличится отношение сигнал/шум. Стоит отметить, что увеличение дальности обнаружения можно достичь только в случае когерентной фильтрации всех импульсов пачки. Размер пачки может достигать вплоть до нескольких тысяч импульсов [11].

Для обеспечения вероятности правильного обнаружения 80% и ложной тревоги 10^{-6} требуется отношение сигнала к шуму равное 15 дБ [12].

Таким образом, энергетические параметры сигнала, а именно произведение $M \cdot N$, должны быть выбраны с учётом обеспечения требуемой наклонной дальности обнаружения УО. Оценка требуемого произведения $M \cdot N$ для обнаружения УО в зависимости от размера граней и дальности представлена на рисунке 5.

Ограничимся максимально возможным значением $M \cdot N \leq 10^6$, считая, что оно аппаратно реализуемо на современном уровне развития техники.

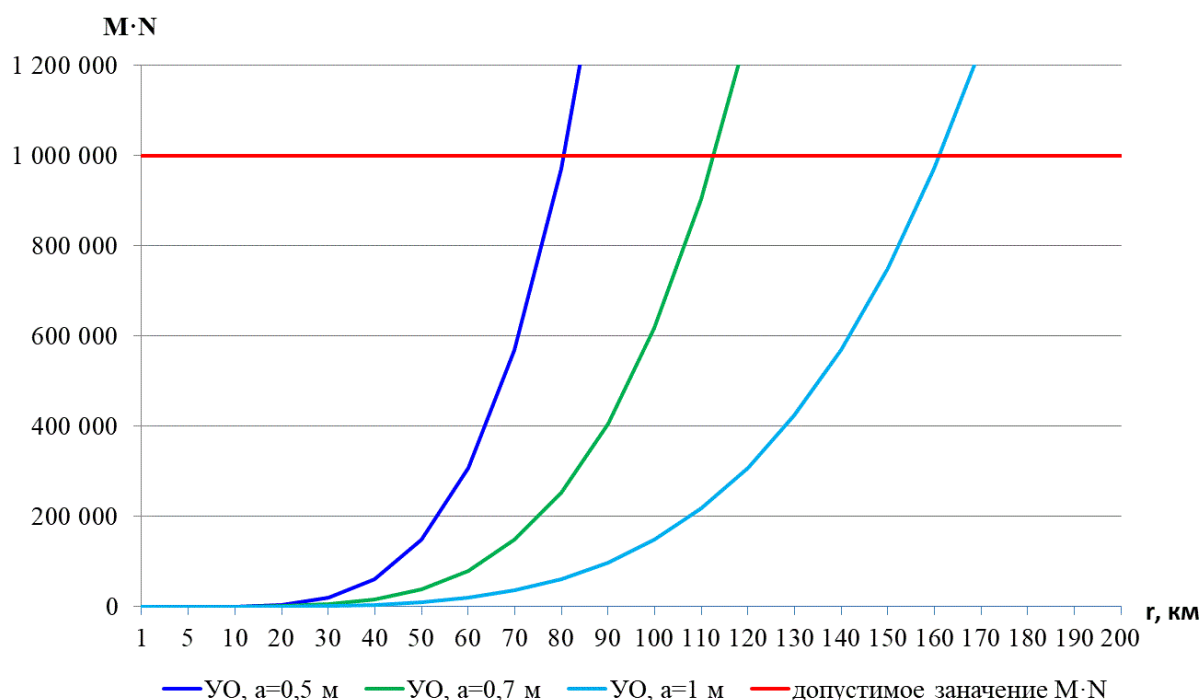


Рисунок 5 - Оценка требуемого произведения $M \cdot N$ для обнаружения УО.

Таким образом, максимальная дальность обнаружения УО размером 1 м не превысит ~ 160 км.

Точность определения координат углового отражателя относительно бортовой системы координат

Для обеспечения высокоточной посадки космического аппарата относительно углового отражателя необходимо определить его положение по дальности, угол по вертикали ζ и угол по горизонтали ψ относительно приборной системы координат бортового радиолокатора (рисунок 6).

Точность определения дальности до углового отражателя зависит от разрешающей способности по дальности, ширины диаграммы направленности антенны и угла направления луча в вертикальной плоскости.

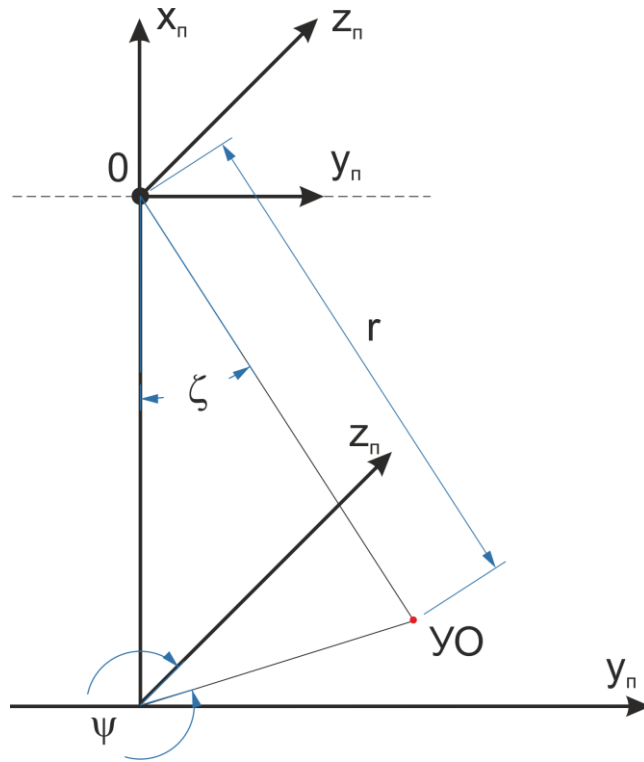


Рисунок 6 - Расположение УО относительно приборной системы координат бортового радиолокатора.

Разрешающая способность по дальности dr определяется формулой:

$$dr = \frac{c\tau_u}{2}, \quad (5)$$

где τ_u – длительность импульса, c – скорость света.

При длительности сигнала $\tau_u=16$ нс, способность по дальности составит $dr=2,4$ м.

Точность определения дальности до УО в зависимости от ширины ДНА θ и угла направления луча в вертикальной плоскости ζ определяется 1/2 диаметра пятна L_r от ДНА на подстилающей поверхности.

Диаметр пятна от ДНА L_r на подстилающей поверхности (рисунок 7) в зависимости от наклонной дальности можно вычислить по формуле [13]:

$$L_r = r1 - r2 = \frac{r \cdot \cos \zeta}{\cos(\zeta + \theta/2)} - \frac{r \cdot \cos \zeta}{\cos(\zeta - \theta/2)}. \quad (6)$$

где r – наклонная дальность, θ – ширина ДНА, ζ – угол направления луча в вертикальной плоскости.

где r – наклонная дальность, θ – ширина ДНА, ζ – угол направления луча в вертикальной плоскости.

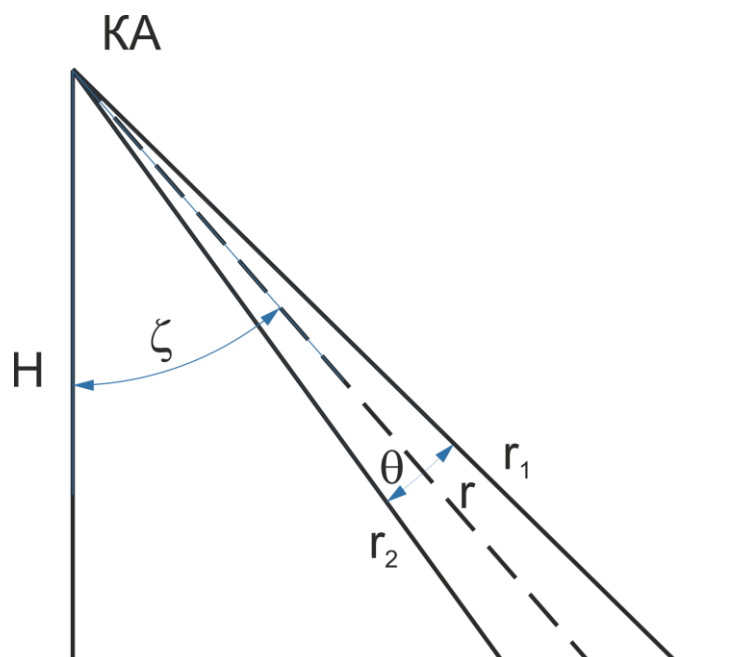


Рисунок 7 - Параметры узкого луча радиолокатора.

Оценка точности определения дальности до УО $L_r/2$ в зависимости от угла направления луча в вертикальной плоскости ζ и с учетом ширины ДНА $\theta=1^\circ$ представлена в таблице 3.

Таблица 3

Точность определения дальности до УО

Наклонная дальность r , м	Точность измерения $L_r/2$, м					
	$\zeta=20^\circ$	$\zeta=30^\circ$	$\zeta=40^\circ$	$\zeta=50^\circ$	$\zeta=60^\circ$	$\zeta=70^\circ$
10	0,03	0,05	0,07	0,10	0,15	0,24
50	0,16	0,25	0,37	0,52	0,75	1,20
100	0,32	0,50	0,73	1,04	1,51	2,39
500	1,59	2,52	3,66	5,19	7,55	11,97
1 000	3,17	5,03	7,31	10,39	15,09	23,93
5 000	15,87	25,17	36,57	51,94	75,47	119,67
7 000	22,21	35,23	51,20	72,71	105,65	167,53
10 000	31,73	50,33	73,14	103,87	150,93	239,33
20 000	63,46	100,66	146,29	207,74	301,86	478,66
50 000	158,66	251,66	365,72	519,36	754,66	1196,66

Исходя из расчетов, на точность измерения дальности до УО при больших значениях наклонной дальности, существенное влияние оказывает ширина ДНА θ , а при малых значениях наклонной дальности – разрешающая способность по дальности dr .

Точность измерения положения УО в горизонтальной плоскости (угол ψ) зависит от ширины ДНА и высоты КА над поверхностью Луны и определяется как $1/2$ диаметра пятна L_h от ДНА на подстилающей поверхности.

Диаметр пятна от ДНА L_h на подстилающей поверхности в зависимости от высоты можно вычислить по формуле:

$$L_h = \theta \cdot H, \quad (7)$$

где H – высота КА над подстилающей поверхностью, θ – ширины ДНА.

Высота КА над подстилающей поверхностью в зависимости от наклонной дальности и от угла направления луча в вертикальной плоскости ζ вычисляется по формуле $H=r \cdot \cos(\zeta)$.

$$H=r \cdot \cos(\zeta) \quad (8)$$

где r – наклонная дальность, ζ – угол направления луча в вертикальной плоскости.

Оценка точности измерения положения УО $L_h/2$ в горизонтальной плоскости по углу ψ в зависимости от угла направления луча в вертикальной плоскости ζ и с учетом ширины ДНА $\theta=1^\circ$ представлена в таблице 4.

Полученные измерения положения уголкового отражателя относительно бортовой системы координат могут быть пересчитаны в систему координат, связанную с точкой посадки и использованы для корректировки навигационной задачи системы управления КА на участке основного торможения.

Точность определения углового положения УО в горизонтальной плоскости

Наклонная дальность r , м	Точность измерения $L_h/2$, м					
	$\zeta=70^\circ$	$\zeta=60^\circ$	$\zeta=50^\circ$	$\zeta=40^\circ$	$\zeta=30^\circ$	$\zeta=20^\circ$
10	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
50	0,15	0,22	0,28	0,33	0,38	0,41
100	0,30	0,44	0,56	0,67	0,76	0,82
500	1,49	2,18	2,80	3,34	3,78	4,10
1 000	2,99	4,37	5,61	6,68	7,55	8,20
5 000	14,94	21,83	28,05	33,42	37,77	40,98
7 000	20,92	30,56	39,27	46,79	52,88	57,38
10 000	29,88	43,65	56,09	66,84	75,55	81,97
20 000	59,77	87,30	112,19	133,67	151,10	163,93
50 000	149,41	218,26	280,47	334,18	377,74	409,84

При анализе данных из таблиц 3 и 4 установлено, что с ростом расстояния до УО точность определения его углового положения и дальности до него существенно снижается уже после 10 км. Целесообразность учета в навигационной задаче результатов локации УО на дальностях более 10 км необходимо исследовать дополнительно.

Результаты исследования

Полученные результаты показывают принципиальную возможность применения бортового сканирующего радиолокатора и УО для повышения точности посадки в выбранном районе Луны.

Расчеты энергетических параметров сигнала показали возможность обнаружения УО с гранями 1 м бортовым радиолокатором на расстоянии более 150 км при условии улучшения характеристик приемо-передающей системы за счет согласованной фильтрации с фазово-кодовой манипуляцией и когерентного накопления пачки импульсов. Однако стоит отметить, что измерения на таких дальностях являются неэффективными с точки зрения их точности. Расчетные случаи показали, что измерения положения УО бортовым радиолокатором будут эффективны на дальностях менее 10 км, когда точность локации УО сможет составить менее 100 м и при сближении (уменьшении дальности) будет только возрастать.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Международные проекты Госкорпорации «Роскосмос» // URL: <https://www.roscosmos.ru/22888/>
2. 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. № 99. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91814>
3. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К., Дмитриев А.О. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>
4. Лихачев В.Н., Сихарулидзе Ю.Г., Федотов В.П. Этап основного торможения для выполнения мягкой посадки на поверхности Луны как один из видов коррекции траектории // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 5. С. 27-33
5. Сколник М.И. Справочник по радиолокации // М.: «Техносфера». 2014. Т.1. 671 с.
6. Незлин Д.В. Радиотехнические системы: учебное пособие // Москва: МИЭТ. 2008. 204 с.
7. Крупенио Н.Н. Радиоисследования планет с космических аппаратов // М.: «Знание». 1978. 64 с.
8. Гордеев А.Ю., Яцышен В.В. Радиолокация при наличии пассивных помех с помощью поляризованных электромагнитных волн и анализа рассеянного излучения // Вестник ВолГУ. 2012. Вып. 6. Серия 10. С. 24-29.
9. Пешков И.В. Радиолокация (направление «Радиотехника»): учебное пособие // Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. 2018. 44 с.

10. Христофоров А.В. Согласованная фильтрация сигналов устройствами на ПАВ (учебно-методическое пособие) // Казань: Физический факультет Казанского государственного университета. 2004. 20 с.

11. Быстров Р.П., Черепенин В.А. Теоретическое обоснование возможностей применения метода генерации мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения при создании радиолокационных систем электронной борьбы (РЭБ) для поражения объектов // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr10/5/text.html>.

12. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли // М.: «Радиотехника». 2005. 368 с.

13. Тепляков И.М. Радиолокационная станция для управления посадкой космического аппарата на поверхность Луны // М.: ИП Радио-Софт. 2016. 200 с.

References

1. [Mezhdunarodnie proekti Goskorporatsii «Roskosmos»](https://www.roscosmos.ru/22888/), <https://www.roscosmos.ru/22888/>
2. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A., Mitkin A.S., Moskatinev I.V., Sisoiev V.K., Shirshakov A.E. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2018, no 99, available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91814>
3. Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sisoiev V.K., Dmitriev A.O. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2020, no 114, available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>
4. Likhachev V.N., Sikharulidze Yu.G., Fedotov V.P. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, no 5, pp. 27-33.
5. Skolnik M.I. *Spravochnik po radiolokatsii* (Radar Reference Book), Moscow, Tekhnosfera, 2014, vol. 1, 671 p.
6. Nezlin D.V. *Radiotekhnicheskie sistemi: uchebnoe posobie* (Radio engineering systems: a training manual), Moscow, MIET, 2008, 204 p.
7. Krupenio N.N. *Radioissledovaniya planet s kosmicheskikh apparatov* (Radio exploration of planets from spacecraft), Moscow, Znanie, 1978, 64 p.
8. Gordeev A.Yu., Yatsishen V.V. *Vestnik VolGU*, 2012, release 6. series10, pp.

24-29.

9. Peshkov I.V. *Radiolokatsiya (napravlenie «Radiotekhnika»): uchebnoe posobie* (Radar Technology (Radio Engineering): Textbook), Yelets, Yeletskii gosudarstvennii universitet im. I.A. Bunina, 2018, 44 p.
10. Khristoforov A.V. *Soglasovannaya filtratsiya signalov ustroistvami na PAV (uchebno-metodicheskoe posobie)* (Coordinated signal filtering by SAW devices (educational and methodological guide)), Kazan, Fizicheskii fakultet Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004, 20 p.
11. Bistrov R.P., Cherepenin V.A. *Zhurnal radioelektroniki*, 2010, no 4, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr10/5/text.html>.
12. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio broadcasting. Radar systems for remote sensing of the Earth), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.
13. Teplyakov I.M. *Radiolokatsionnaya stantsiya dlya upravleniya posadkoi kosmicheskogo apparata na poverkhnost Luni* (A radar station for controlling the landing of a spacecraft on the surface of the Moon), Moscow, IP Radio-Soft, 2016, 200 p.

Информация об авторах

Людмила Витальевна Вернигора, кандидат технических наук, руководитель проекта «КС-ЛЭС», Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина", Московская обл., г. Химки, Россия; e-mail: VernigoraLV@laspace.ru

Павел Владимирович Казмерчук, кандидат технических наук, главный конструктор Лунной программы, Акционерное общество "Научно-Производственное Объединение Им. С.А. Лавочкина", Московская обл., г. Химки, Россия; e-mail: Pavel.Kazmerchuk@Gmail.com.

Information about the authors

Lyudmila V. Vernigora, Ph.D. in Technical Sciences, Project Manager of the "KS-LES" Project, JSC "NPO Lavochkin", Khimki, Moscow Region, Russia; e-mail: VernigoraLV@laspace.ru

Pavel V. Kazmerchuk, Ph.D. in Technical Sciences, Chief Designer of the Lunar Program, JSC “NPO Lavochkin”, Khimki, Moscow Region, Russia;
e-mail: Pavel.Kazmerchuk@Gmail.com.

Получено 11 ноября 2025 ● Принято к публикации 12 декабря 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 11 November 2025 ● Accepted 12 December 2025 ● Published 30 December 2025
