DOI: 10.18721/JPM.10304 УДК 681.51:621:391

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СОСТАВА ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.А. Кислицына¹, Г.Ф. Малыхина²

1Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и техни-

ческой кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложен метод измерения параметров движения аппарата, спускаемого на поверхность Луны. С помощью четырех приемников детектируются рассеянные на поверхности гамма-кванты, излучаемые радиоактивным источником, в условиях неопределенности элементного состава подстилающей лунной поверхности. Наличие радиолокационной системы на спускаемом аппарате позволяет выполнять адаптацию гамма-лучевого высотомера к составу лунного грунта. Предложена математическая модель измерительной системы, и получены зависимости интенсивности потоков регистрируемых гамма-квантов от высоты и углов наклона спускаемого аппарата. Модель позволяет выполнять анализ взаимного положения источника и детекторов излучения, анализировать влияние состава подстилающей поверхности. Алгоритм измерения использует рекурсивную нейронную сеть, которую предложено обучать заранее и адаптировать в процессе посадки спускаемого аппарата.

Ключевые слова: спускаемый аппарат; рассеянное гамма-излучение, адаптация; состав лунного грунта

Ссылка при цитировании: Кислицына И.А., Малыхина Г.Ф. Моделирование системы измерения параметров движения спускаемого аппарата в условиях неопределенности состава лунной поверхности // Научно-технические ведомости СПБГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 38–51. DOI: 10.18721/JPM.10304

SIMULATION OF ON-THE-FLY MEASURING SYSTEM OF A DESCENT MODULE UNDER UNCERTAINTY OF THE LUNAR-SURFACE COMPOSITION

I.A. Kislitsyna¹, G.F. Malykhina²

¹State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,

St. Petersburg, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The measurement method for determination of the motion parameters of the module de-orbiting upon the lunar surface has been suggested. The surface-scattered gammas emitted by a radioactive source are detected using four receptors under uncertainty of the lunar-soil's elemental composition. The radar-tracking system's exist in the module allows adaptation of the gamma-ray altimeter to the lunar-soil composition. A mathematical model of the measuring system has been put forward, and dependences of the gammas' flux level on the module altitude and the angle of the slanted surface were obtained. The model makes possible analyzing the relative position of the radioactive source and the receptors and the composition effect of

the substrate. The measurement algorithm uses a recursive neural network, which is proposed to train in advance and adapt during the module landing. **Key words:** descent module; scattered gamma radiation; adaptation; lunar-soil composition

Citation: I.A. Kislitsyna, G.F. Malykhina, Simulation of on-the-fly measuring system of a descent module under uncertainty of the lunar-surface composition, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10 (3) (2017) 38–51. DOI: 10.18721/JPM.10304

Введение

Для успешной посадки спускаемого аппарата на поверхность Луны требуются достаточно точные управляющие воздействия на двигатели мягкой посадки. Для этого необходимо обеспечить максимальную точность измерения параметров движения спускаемого аппарата: его скорости, высоты над поверхностью и угла наклона подстилающей поверхности.

Для измерения высоты над поверхностью применяются электромагнитные излучения разного вида и частоты: лазерное, радиоволновое, инфракрасное, гамма-лучевое, рентгеновское; используются фото- и видеокамеры [1, 2].

Лазерные системы использованы, например, в совместной программе «Вері-Colombo» Европейского космического агентства (ЕКА), в программе космической автоматической миссии к Меркурию Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency), в программе NASA по картографированию поверхностей Луны и Меркурия, при заборе и доставке на Землю образцов грунта с поверхности Фобоса (спутник Марса).

С помощью радиолокационной системы была осуществлена посадка марсохода «Opportunity», разработанного NASA для исследования поверхности Марса. Указанная система выполняла измерения высоты до полутора метров, после чего подавался сигнал на фотокамеру «DIMES» (Descent Image Motion Estimation Subsystem) для определения горизонтальной скорости.

Измерение высот межпланетных автоматических станций «Фобос-1» и «Фобос-2» планировалось осуществить с помощью рентгеновского высотомера-вертиканта, который работал в наносекундном диапазоне длин волн. Угловые координаты измерялись время-импульсным способом по разнице времени приема сигналов двумя парами разнесенных детекторов. Однако обе миссии по исследованию спутника Марса закончились неудачно.

Несмотря на то, что все перечисленные приборы, разные использованные физические принципы активно применялись и применяются в авиакосмической технике, существуют некоторые факторы, препятствующие точному измерению параметров спуска.

Во-первых, в связи с острой фокусировкой лазерного излучения, неровности поверхности могут привести к значительным погрешностям измерения.

Во-вторых, ограничивающими факторами применения радиовысотомеров выступают как невозможность распространения электромагнитных волн через плазму работающих двигателей мягкой посадки, так и увеличение погрешностей измерения по мере уменьшения высоты.

В-третьих, при работе реактивных двигателей посадки над лунной поверхностью поднимается пыль, а это ограничивает применение систем, чувствительных к прозрачности среды.

В-четвертых, применение высотомеров на основе рентгеновского излучения ограничено необходимостью охлаждения анода рентгеновской трубки, так как большая часть кинетической энергии электронов превращается в тепло и требуются значительные затраты энергии на охлаждение.

В отечественной и зарубежной литературе имеются сведения о целесообразности использования интегрированных систем измерения параметров движения космических аппаратов. Создание системы, состоящей из группы приборов, каждый из которых измеряет определенные параметры движения спускаемого аппарата, рассмотрено в статье [3]. Измерение углов наклона спускаемого аппарата, его высоты над подстилающей поверхностью и обнаружение препятствий выполняются с помошью звездных датчиков, гироскопов, акселерометров, высотомеров, датчиков солнечного излучения и лунных датчиков [4]. Примером объединения системы оптической навигации и инерциальной системы может служить система прилунения, описанная в статье [5]. Соединение нескольких приборов, в которых используются разные физические принципы, в одну систему позволяет снизить погрешности измерений, сделать возможным применение системы в различных условиях среды, расширить диапазон измеряемых параметров.

В настоящем исследовании для измерения параметров движения спускаемого аппарата предлагается объединить радиолокационную и гамма-лучевую системы (работа последней основана на регистрации интенсивности рассеянного гамма-излучения).

При этом измерения на высотах от 500 до 10 м можно выполнять с помощью радиолокационной системы, а на высотах от 15 до 0 м — с помощью гамма-лучевой. Последняя позволяет выполнять измерения через обшивку спускаемого аппарата в условиях плазмы двигателей мягкой посадки. Эта система практически не чувствительна к слою пыли на поверхности планеты и к случайным препятствиям; она обеспечивает достаточно высокую точность измерений на малых высотах, так как зависит лишь от активности источника излучения.

Задача исследования

Гамма-лучевая система для обеспечения мягкой посадки спускаемого аппарата, разработанная в Центральном научно-исследовательском институте робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) [6], успешно применяется в современных системах посадки на Землю. Для разработки системы посадки на поверхность Луны требуется выполнить доработку существующей системы, ввиду других условий такой посадки.

Например, в условиях посадки на Луну отсутствие атмосферы не позволяет использовать парашюты, и, следовательно, движение становится менее равномерным, чем на Земле. Кроме того, солнечный ветер обуславливает высокий радиационный фон. Далее, места посадки на Землю, в отличие от таковых на Луну, достаточно хорошо изучены, получены характеристики грунтов, определяющие свойства рассеяния гамма-квантов [7]. Неопределенность же состава грунта в месте посадки приводит к уменьшению точности определения положения спускаемого аппарата относительно поверхности, поэтому требуется дополнительная адаптация гамма-лучевой системы к типу грунта. На высотах от 15 до 10 м радиолокационная и гамма-лучевая системы могут работать одновременно, что создает возможность адаптации последней к составу лунного грунта в месте посадки.

Задачей настоящего исследования является разработка метода и алгоритма измерения параметров движения спускаемого аппарата, использующих принцип мягкого перехода от измерений с помощью радиолокационной системы к измерениям с помощью гамма-лучевой системы на основе адаптации последней к составу грунта в районе посадки.

Моделирование системы измерения малых высот

Фактор состава грунта подстилающей поверхности. Физические величины, характеризующие рассеяние гамма-квантов, зависят от структурного и химического состава подстилающей поверхности. Частицы грунта, расположенные на поверхности Луны, представляют собой крупные обломки и редкие выходы пород скального основания, которые постепенно покрываются микрократерами размером от долей микрометров до нескольких сантиметров [8, 9]. В результате метеоритной бомбардировки, ультрафиолетовых лучей, солнечного ветра и температурного выветривания, на поверхности Луны образовался покров из рыхлого материала, называемого реголитом, который состоит из обломков коренных пород и вторичных частиц, сформированных при ударно-взрывной переработке вещества (так называемая брекчия и частицы стекла) [10]. Средняя толщина слоя реголита, коМатематическое моделирование физических процессов

торый покрывает всю лунную поверхность, колеблется от 4 - 5 м в лунных морях до 10 - 15 м на материках.

Химический состав реголита отражает состав нижезалегающих пород, но в нем присутствуют другие вещества и минералы [11]. Основные минералы лунных пород это плагиоклаз (твердый раствор альбита NaAlSi₃O₈ и анортита CaAl₂Si₂O₈), ортопироксен (Mg, Fe)SiO₃, клинопироксен (Ca,Mg,Fe)SiO₃, оливин (Mg, Fe)₂SiO₄, ильменит FeTiO₃ и минералы группы шпинели (FeCr₂O₄-Fe₂TiO₄-FeAl₂O₄).

Среди пород материковой породы Луны выделяют серию железистых анортозитов, магнезиальную интрузивную серию (содержит 7 – 45% MgO₂, 2 – 29% Al₂O₃, 0,5% TiO₂), щелочную интрузивную серию (0,5 – 5% TiO₂, 0,4 – 17% FeO, 0,3 – 0,5% K₂O, 65 – 75% SiO₂) и серию редкоземельных неморских базальтов (15 – 24% Al₂O₃, 9 – 15% FeO) [12].

Лунные моря представляют собой вулканические (лавовые) равнины, заполняющие понижения в рельефе материков, причем понижения обычно являются днищами крупнейших ударных кратеров и бассейнов. Среди морских пород Луны преобладают морские базальты; их исследователи делят на несколько групп по признаку содержания титана, алюминия и калия.

Таким образом, состав грунта подстилающей поверхности, определяющий интенсивность рассеяния гамма-квантов, может быть самым разным в местах посадки. С целью выявления зависимости данных регистрации рассеянного гамма-излучения от высоты над подстилающей поверхностью, от углов наклона спускаемого аппарата к этой поверхности и от состава грунта, нами было выполнено моделирование процессов взаимодействия потока гамма-квантов с лунной поверхностью и его регистрации.

Моделирование процесса регистрации рассеянного гамма-излучения. При моделировании процесса взаимодействия потока гамма-квантов с лунной поверхностью использован примерный состав грунта, приведенный в таблице.

Дифференциальное сечение $d_{\sigma_{\Theta}}$ компто-

Таблица

Наименование грунта	Химический состав	Эффектив- ный атом- ный номер	Концентрация электронов	Плотность	Комптонов- ское сечение
		$Z_{_{e\!f\!f}}$	$n_e, 10^{23}$	ρ, г/см ³	σ_0 , 10^{-4} cm ²
Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	11,170	2,985	2,610	2,217
Ильменит	FeTiO ₃	22,149	2,858	4,720	4,209
Оливин	Fe ₂ SiO ₄	23,103	2,896	3,270	4,390
	Mg ₂ SiO ₄	14,411	1,668	9,097	1,599
Анортит	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	13,385	2,987	3,270	2,659
Пироксен	Na ₂ Si ₂ O ₆	11,027	3,525	8,846	2,585
	Ca ₂ Si ₂ O ₆	15,587	3,007	10,372	3,116
Ортопироксен	MgSi ₂ O ₃	6,990	2,435	6,990	2,742
	FeSi ₂ O ₃	8,397	2,497	8,397	3,282
Клинопироксен	CaSiO ₃	15,587	3,007	5,186	3,116
	MgSiO ₃	14,485	2,889	4,482	2,889
	FeSiO ₃	5,890	2,282	20,783	3,154
Шпинель	FeCr ₂ O ₄	22,814	2,905	9,993	4,408
	Fe ₂ TiO ₄	22,995	2,852	7,487	4,326
	FeAl ₂ O ₄	19,891	2,663	7,759	4,326

Характеристики основных лунных пород

новского рассеяния гамма-квантов на один электрон, отнесенное к единице телесного угла $d\Omega$, выражается формулой Клейна — Нишины — Тамма:

$$\frac{d\sigma_{\Theta}}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\Theta)} \right]^2 \times \\ \times \left[1 + \cos^2\Theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos\Theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos\Theta)} \right],$$
(1)

где Θ — угол рассеяния гамма-квантов, r_e — классический радиус электрона, α — отношение энергии гамма-кванта E_{γ} к энергии покоящегося электрона $m_e c^2$.

Классический радиус электрона

 $r_e = ar_c \approx 2,8179 \ (фм),$

где a = 1/137,04 (константа), $r_c - дли-$ на волны красной границы фотоэффекта; $r_c = \hbar/m_e c \ (m_e -$ масса электрона, c -скорость света).

Величина $\alpha \approx 1,129$ при значении $E_{\gamma} = 660$ кэВ (энергия первичного гамма-излучения).

При разработке системы измерения параметров движения спускаемого аппарата представляют интерес углы рассеяния в диапазоне от 90 до 180 град. При уменьшении энергии излучения источника вероятность рассеяния в рассматриваемом диапазоне углов возрастает. Однако при уменьшении энергии увеличивается коэффициент массового поглощения гамма-квантов, а следовательно, уменьшается глубина рассеивающего слоя. Поэтому целесообразно в качестве источника использовать изотоп Cs¹³⁷ с энергией 660 кэВ. При такой величине энергии вероятность рассеяния меньше зависит от угла рассеяния в диапазоне углов от 90 до 180 град.

Для смеси веществ на лунной поверхности можно вычислить эффективный атомный номер грунта подстилающей поверхности по формуле:

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6} (\eta_i Z_i)^4}{\sum_{i=1}^{6} (\eta_i Z_i)}},$$
(2)

где η_i — доля *i*-го элемента в смеси веществ

грунта, Z_i – атомный номер *i*-го элемента грунта.

Концентрация электронов подстилающей поверхности следует выражению

$$n_{e} = \sum_{i=1}^{6} \eta_{i} \frac{N_{A}}{M_{Ai}} Z_{i}, \qquad (3)$$

где $N_{\rm A}$ — число Авогадро, M_{Ai} — атомная масса элемента грунта.

Комптоновское сечение выражается как

$$\sigma_0 = 8,46 \cdot 10^{-25} n_e Z_{eff},\tag{4}$$

где n_e — количество электронов, Z_{eff} — эффективный атомный номер рассеивающего вещества.

Интенсивность рассеянного гаммаизлучения I_{Θ} в зависимости от интенсивности первичного излучения I_0 , угла рассеяния Θ на расстоянии *r* от рассеивающего электрона рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\Theta} = I_0 \frac{3\sigma_0}{16\pi r^2} \frac{(1+\cos^2\Theta)}{[1+\alpha(1-\cos^2\Theta)]^3} \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{\alpha(1-\cos\Theta)^2}{[1+\alpha(1-\cos\Theta)] \cdot (1-\cos\Theta)} \right\}.$$
(5)

На рис. 1 представлен график угловой зависимости нормализованного уровня гамма-излучения, т. е. отношения интенсивности этого излучения, рассеянного под углом Θ , к интенсивности первичного излучения при разных значениях расстояния до детектора:

$$lg\left(\frac{I_{\Theta}}{I_{0}}\right) = lg\left(\frac{3\sigma_{0}}{16\pi r^{2}}\frac{(1+\cos^{2}\Theta)}{[1+\alpha(1-\cos^{2}\Theta)]^{3}}\times\right) \\ \times \left\{1 + \frac{\alpha(1-\cos\Theta)^{2}}{[1+\alpha(1-\cos\Theta)]\cdot(1-\cos\Theta)}\right\}.$$
(6)

В результате выполненных расчетов установлено, что интенсивность рассеянного излучения снижается при увеличении угла рассеяния. При значениях угла рассеяния в рабочем диапазоне от 90 до 180 град интенсивность гамма-квантов падает более, чем в 10 раз, и одновременно ее зависимость от угла рассеяния становится менее выраженной.



Рис. 1. Зависимости нормализованного уровня гамма-излучения от угла рассеяния гамма-квантов при различных расстояниях *r* от рассеивающего элемента; r = 0.5 (кривая *I*), 1,0 (*2*), 1,5 (*3*), 2,0 (*4*), 2,5 (*5*), 3,0 (*6*), 4,0 (7)

Энергия рассеянного излучения соотносится с углом рассеяния следующим образом:

$$E = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma} / m_e c^2)(1 - \cos \Theta)}.$$
 (7)

Зависимость этой энергии от угла рассеяния для источников гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} = 440 - 660$ кэВ, в том числе для Cs¹³⁷ ($E_{\gamma} = 660$ кэВ), показана на рис. 2.

Энергия' гамма-квантов убывает с ростом угла их рассеяния. При значениях угла рассеяния от 90 до 180 град энергия рассеянного излучения снижается по сравнению с энергией первичного и приближается к 200 кэВ. Энергия рассеянных гамма-квантов в рабочем диапазоне становится менее зависимой от энергии источника.

Фактор размещения источников и приемников излучения на спускаемом аппарате. Взаимное расположение составных частей гамма-лучевой системы (источника гаммаизлучения и двух приемников, включающих сцинтилляционные детекторы) пока-



Рис. 2. Зависимости энергии рассеянного гамма-излучения от угла рассеяния при различных значениях энергии источников гамма-квантов E_0 , кэВ: 460 (1), 510 (2), 560 (3), 610 (4), 660 (5)



Рис. 3. Проекции расположения источника (S) и приемников излучения (D₁ – D₄) на горизонтальную (*a*) и вертикальную (*b*) плоскости; depth – глубина залегания в грунт рассеивающего элемента

зано на рис. 3. Источник гамма-излучения размещен ближе к центру, а два детектора (D_1 , D_2) расположены по краям, на расстоянии l от источника. Спускаемый аппарат может находиться под некоторым углом к подстилающей поверхности, причем угол наклона оси, на которой расположены два приемника, обозначен как γ ; h — текущее значение высоты спускаемого аппарата, Ψ — угол падения прямого потока гаммаквантов, φ — угол между проекцией оси, где расположен детектор D_1 , и радиусом, проходящим через точку падения луча; Θ угол рассеяния гамма-квантов, которые достигают детектора D_1 .

Зависимости крайних углов регистра-

ции гамма-квантов детекторами от высоты имеют вид:

$$\Theta_1 = \pi - \operatorname{arctg} \frac{l}{h}; \ \Theta_2 = \pi - \operatorname{arctg} \frac{l+w}{h},$$

где w — ширина детектора; разность Θ_1 и Θ_2 определяет диапазон углов регистрации рассеянных гамма-квантов на определенной высоте (диапазон зависит от ширины детектора).

С увеличением высоты спускаемого аппарата угол регистрации рассеянных гаммаквантов растет, приближаясь к 180 град. При малых высотах угол регистрируемых гамма-квантов уменьшается, приближаясь к 90 град. Наклон спускаемого аппарата по отношению к плоскости подстилающей поверхности определяется двумя углами: γ_1 и γ_2 — углы наклона осей, соединяющих детекторы D₁ с D₂ и D₃ с D₄ соответственно.

Сечение комптоновского рассеяния на один электрон, в границах телесного угла излучения, определяется путем интегрирования по углу рассеяния:

$$\sigma(\Theta_1, \Theta_2) = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \frac{r_e^2}{2} \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \Theta)} \right]^2 \times \\ \times \left[1 + \cos^2 \Theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos \Theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \Theta)} \right] d\Theta.$$
(8)

Для оценки результатов регистрации детекторами величины интенсивности потока гамма-квантов, рассеянных от лунной поверхности, выполняется расчет геометрии гамма-лучевой системы. Квадрат расстояния от рассеивающего элемента до детектора определяется по формуле

$$r^{2} = h^{2} \operatorname{tg}^{2} \Psi + l^{2} \cos^{2} \gamma -$$

- 2hl \cos \gamma \operatorname{tg} \Psi + (h + l \sin \gamma)^{2}. (9)

Косинус угла *ф* между осью расположения рассеивающего элемента и детектора излучения следует выражению

$$\cos \varphi = \frac{(h + l \sin \gamma)^2 + (h \operatorname{tg} \psi)^2}{hl \cos \gamma \operatorname{tg} \psi} + \frac{(l \cos \gamma)^2 - r^2}{hl \cos \gamma \operatorname{tg} \psi}.$$
(10)

Косинус угла рассеяния выражается

следующей формулой:

$$\cos(\pi - \Theta) = \frac{h^2(1 + tg^2\Psi) + r^2 - l^2}{2rh\sqrt{(1 + tg^2\Psi)}}.$$
 (11)

Детектор регистрирует гамма-кванты, рассеянные рассеивающим элементом на лунной поверхности, положение которого характеризуется значением угла Ψ для потока падающего прямого излучения, и значением угла φ , характеризующего положение рассеивающего элемента на плоскости. Диапазон значений угла Ψ определяется углом коллимации источника $0 \le \Psi \le \Psi_{max}$, а значения угла φ лежат в диапазоне $[-\pi, \pi]$. Расстояние от проекции центра на плоскость рассеяния до рассеивающего элемента определяется по формуле $\rho = h \operatorname{tg} \Psi$.

Интенсивность рассеянного гаммаизлучения, воспринимаемого одним из детекторов (например, D_1) зависит от угла наклона γ оси расположения детектора над подстилающей поверхностью, высоты h, расстояния r между источником и детектором излучения, угла коллимации Ψ_{max} . Интенсивность потока детектируемых гаммаквантов можно получить интегрированием по объему рассеивающего вещества:

$$I_{d} = \int_{dpt} \iint_{\varphi \ \varphi} e^{-\mu(E) \cdot \rho \cdot dpt} I_{\Theta}(r, l, \gamma, \Psi, h, \varphi, \Theta) \times$$

$$\times d(dpt) d\varphi d\rho,$$
(12)

где $\mu(E)$ — коэффициент массового поглощения, зависящий от энергии гамма-квантов; ρ — плотность слоя лунной поверхности; *dpt* — глубина, на которой расположен рассеивающий элемент.

Интенсивность потока рассеянных гамма-квантов зависит от взаимного расположения источника и приемников излучения. Ее можно вычислить с использованием выражений (5), (9) – (11) по формуле

$$I_{\Theta}(r, l, \gamma, \Psi, h, \varphi, \Theta) =$$

$$= I_0 \frac{3\sigma_0}{16\pi r^2} \cdot \frac{(1 + \cos^2 \Theta)}{[1 + \alpha(1 - \cos^2 \Theta)]^2} \times (13)$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \Theta)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos \Theta)] \cdot (1 + \cos^2 \Theta)} \right\}.$$

Количество электронов в объеме dV

определяется по формуле

$$n_e(dV) = \frac{dV \cdot N_A}{M_A} \cdot \rho, \qquad (14)$$

где ρ — плотность грунта, $N_{\rm A}$ — число Авогадро, M_{A} — молекулярная масса.

Значение массового коэффициента поглощения кремнием гамма-квантов с энергией 660 кэВ $\mu_1 = 0,0802 \text{ см}^2/\text{г}$, а значение такого коэффициента для гамма-квантов, обладающих энергией 200 кэВ после рассеяния, $\mu_2 = 0,123 \text{ см}^2/\text{г}$.

Поток гамма-квантов, достигающих детектор, ослабляется в результате рассеяния, в соответствии с выражением

$$J_{\text{detect}} = J \cdot e^{-(\mu 1 + \mu 2) \cdot \rho \cdot (h + dpt)}, \qquad (15)$$

где ρ — плотность грунта, (h + dpt) — расстояние от источника до рассеивающего элемента.

Анализ результатов моделирования

В соответствии с приведенным выше описанием различных факторов, влияющих на процессы взаимодействия потока гамма-квантов с лунной поверхностью и его регистрации, были представлены стадии моделирования гамма-лучевой системы при различных высотах и углах наклона спускаемого аппарата.

В результате моделирования получены зависимости интенсивности потока рассеянных гамма-квантов, попадающих на детектор, от высоты спускаемого аппарата над лунной поверхностью, при различных значениях угла наклона спускаемого аппарата (рис. 4). Видно, что интенсивность потока гамма-квантов повышается по мере снижения высоты над поверхностью Луны и уменьшения угла наклона спускаемого аппарата относительно этой поверхности. Влияние угла наклона на принимаемый сигнал становится заметным только на небольших высотах (h < 5 м).

Таким образом, при малых значениях высоты (h < 1 м) точность измерений высоты спуска увеличивается, что, несомненно, является достоинством метода регистрации. Чтобы найти значение угла наклона γ_1 спускаемого аппарата над подстилающей поверхностью, целесообразно измерять



и вычислять разности значений потоков гамма-квантов, регистрируемых двумя детекторами D₁ и D₂.

Влияние состава грунта. Важным достоинством проведенного моделирования является возможность оценить влияние состава грунта. В соответствии с соотношением (4), этот состав определяет величину комптоновского сечения; при этом значение последнего может изменяться почти в два раза. Если же не учитывать состав грунта, то погрешность измерения высоты спускаемого аппарата над подстилающей поверхностью может достигать десятков процентов. В связи с этим требуется разработать алгоритм измерения параметров движения спускаемого аппарата с целью их адаптации к составу лунной поверхности.

Адаптивный алгоритм измерения параметров движения спускаемого аппарата

Относительная интенсивность потока рассеянных гамма-квантов зависит от состава грунта в месте посадки. В результате экспедиций на Луну состав грунта был изучен достаточно хорошо на некоторых участках ее поверхности — в местах посадки исследовательских модулей [8]. Тем не менее, посадку необходимо успешно производить и в других, неисследованных ранее, областях, например, при отклонении от расчетного места посадки.

Для обеспечения посадки в неисследованных областях разработан алгоритм измерения, который позволяет адаптироваться к месту посадки. Он объединяет показания двух высотомеров, работающих на разных физических принципах: радиолокации и эффекта Комптона. Кроме того, два высотомера работают на разных диапазонах высот. В процессе приближения к поверхности, погрешности измерения с помощью радиовысотомера возрастают, а погрешности гамма-лучевого высотомера снижаются. В интервале высот от 20 до 10 м работают одновременно два высотомера, показания одного из которых, как было показано, зависят от состава грунта. Это дает возможность выполнять адаптацию алгоритма измерения гамма-лучевого высотомера с учетом показаний радиовысотомера и последующим плавным переключением на показания только одного гамма-лучевого высотомера.

Предлагается использовать нейросетевой алгоритм измерения параметров движения. Важное свойство нейронной сети состоит в способности к обучению и к обобщению полученных знаний [13]. Обученная на ограниченном множестве специальных вы-

борок, нейронная сеть обобщает накопленную информацию и вырабатывает ожидаемую реакцию применительно к данным, не vчаствовавшим в процессе обучения [14]. Нейронная сеть способна самостоятельно определять неинформативные для анализа параметры и производить их отсев. В связи с этим пропадает необходимость дополнительного анализа информационного вклада входных данных. Нейронные сети можно переучить в новых условиях окружающей среды, описываемых колебаниями параметров этой среды. Для нестационарной среды (ее свойства изменяются с течением времени) можно использовать нейронные сети, которые способны переучиваться в реальном времени, причем чем выше адаптивные способности системы, тем более устойчивой будет ее работа в нестационарной среде [15]. Возможность параллельной обработки информации современными процессорами обеспечивает быстродействие нейронных сетей. Благодаря этой способности, при большом количестве межнейронных связей достигается значительное ускорение процесса обработки информации, причем в реальном времени.

Чтобы уменьшить влияние типа грунта подстилающей поверхности на точность измерений, предлагается использовать нелинейную авторегрессионную сеть с внешними входами, обозначаемую обычно как NARX [16] (рис. 5). Для обучения был использован алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба — Шанно. Данные, полученные в результате моделирования, были использованы для предварительного обучения нейронной сети, при значении угла наклона спускаемого аппарата $\gamma = 0$ и предполагаемом составе грунта. Итак, при спуске аппарата в интервале высот от 20 до 10 м работают два высотомера. Показания радиовысотомера используются для адаптации сети.

Предполагается, что он дает показание высоты

$$H_{radio}(i) = H(i) + \Delta_i$$

с погрешностью Δ_i , которая имеет случайный характер и возрастает вплоть до 60 %, когда приближается к значению высоты 10 м над поверхностью Луны:

$$\Delta_i = 0, 3 \cdot \varepsilon_i (21 - H(i)), i = 1, 2, ..., N;$$

$$H = 20, ..., 10,$$
(16)

где ε_i — нормально распределенная случайная величина.

Погрешность измерения высоты с помощью гамма-лучевого высотомера моделировалась как случайная величина, распределенная по закону Пуассона.

Результаты моделирования зависимости интенсивности детектируемого гаммаизлучения от высоты в диапазоне от 20 до 10 м при разных значениях величины σ_0 , характеризующей состав грунта подстилающей поверхности, показаны на рис. 6.

Анализ представленных данных показывает, что зависимость интенсивности



Рис. 5. Нейронная сеть NARX, используемая для измерения высоты *h* и угла наклона ү спускаемого аппарата к подстилающей лунной поверхности:

 D_1 , D_2 – детекторы, DU (delay unit) – блоки задержек, Output signal – выходной сигнал



Рис. 6. Зависимости нормализованного уровня детектируемого гамма-излучения от высоты спускаемого аппарата над подстилающей поверхностью при различных составах лунного грунта (значениях показателя $k\sigma_0$); k = 0,50 (1), 0,75 (2), 1,00 (3), 1,25 (4), 1,50 (5). Углы наклона положительные

детектированного излучения от состава грунта может приводить к существенным методическим погрешностям измерения высоты и угла наклона спускаемого аппарата. Поэтому необходимо выполнить адаптацию нейронной сети к разным составам грунта.

На рис. 7 показана в качестве примера структурная схема процесса измерения параметров, которые обеспечивают требуемое

движение спускаемого аппарата над лунной поверхностью. Это необходимо для управления процессом его успешной посадки. На высотах от 20 до 10 м выходные сигналы детекторов рассеянного гамма-излучения $\{I_1, I_2, I_3, I_4\}$ используются для адаптации нейронной сети на основе измерения высоты с помощью радиовысотомера H_{radio} . Для устранения влияния углов наклона спускаемого аппарата мы рекомендуем вы-



Рис. 7. Схемы измерения и адаптации параметров движения на разной высоте спускаемого аппарата от лунной поверхности: *a* – адаптация алгоритма на высоте от 20 до 10 м; *b* – измерение параметров движения после адаптации;

*I*₁ – *I*₄ – интенсивности сигналов четырех детекторов; RA – радиовысотомер (R– радио); TNN – измерение с помощью обученной нейронной сети, адаптированной к типу грунта поверхности



Рис. 8. Результаты адаптации алгоритма к составу лунной поверхности: сплошная кривая 1 и символы (+) относятся к адаптированной зависимости при k = 0,50; k = 0,50 (1), 0,75 (2), 1,00 (3), 1,25 (4), 1,50 (5)

полнять суммирование выходных данных с четырех детекторов. Адаптация нейронной сети обеспечивает получение сети, соответствующей текущему значению σ_0 комптоновского рассеяния и характеризующей состав грунта поверхности.

Для измерения на высотах от 10 до 0,3 м предлагается использовать обученную нейронную сеть TNN (Trained Neural Network), адаптированную к составу грунта.

На рис. 8 представлены результаты адаптации алгоритма измерения на основе модели рассеяния гамма-квантов лунной поверхностью. Штриховыми линиями показаны зависимости среднего значения интенсивности детектируемых гаммаквантов на высотах 20 – 10 м при значениях комптоновского рассеяния гамма-квантов, относящихся к грунтам разного соста-Ba = $\{0, 50\sigma_0, 0, 75\sigma_0, 1, 00\sigma_0, 1, 25\sigma_0, 1, 50\sigma_0\}$. Сплошной линией в качестве примера показан результат адаптации алгоритма для случая $0,50\sigma_0$. Хорошее совпадение кривых, полученных при моделировании и адаптации, позволяет заключить, что предложенный нами алгоритм позволяет выполнять измерения параметров движения спускаемого аппарата при разных составах лунного грунта.

Заключение

С целью разработки систем посадки спускаемых аппаратов на поверхность планет с неопределенным составом их поверхностей, в связи с большой сложностью выполнения натурных экспериментов, предложена математическая модель, позволяющая определять характеристики измерительной системы. Модель позволяет выполнять анализ геометрии расположения источника и детекторов излучения, оценивать интенсивности потоков гамма-квантов, достигающих детекторы, анализировать влияние состава подстилающей поверхности.

Показано, что состав подстилающей поверхности оказывает существенное влияние на данные измерений гамма-лучевой системы. В связи с этим показания гаммалучевых высотомеров необходимо адаптировать к месту посадки. Предложенный нейросетевой алгоритм измерения позволяет выполнять адаптацию измеряющих систем на средних высотах с учетом показаний радио- и гамма-лучевого высотомеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке ЦНИИ Робототехники и технической кибернетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков В.М., Покровский В.П., Сомс Л.Н. Лазерный передающий модуль с переключаемой диаграммой направленности для дальномера космического аппарата «Фобос-грунт» // Оптический журнал. 2011.Т. 78. № 10. С. 4–9.

2. Зубов Н.Е., Савчук Д.В., Старовойтов Е.И. Анализ возможностей оптимизации массы и энергопотребления лазерного высотомера для управления спуском с окололунной орбиты // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 67–74.

3. **Егоров В.В.** Доплеровские радары посадки космических аппаратов на Луну и планеты Солнечной системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 145–151.

4. Huang Xiangyu, Wang Dayi, He Yingzi, Guan Yifeng. Autonomous navigation and control for pin point lunar soft landing // 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems, 2 - 5 June 2008. Tralee, County Kerry, Ireland. Pp. 1–7.

5. **Bilodeau V.S., Clerc S., Drai R., de Lafontaine J.** Optical navigation system for pin point lunar landing // Preprints of the 19th World Congress. The International Federation of Automatic Control. 24 -29 August 2014. Cape Town, South Africa. Pp. 4062-4067.

6. Юревич Е.И. ЦНИИ РТК. История создания и развития. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 1995. 100 с.

7. Юревич Е.И. Фотонная техника. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2003. 192 с.

8. Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы. / Под ред. В.П. Легостаева и

В.А. Лопоты. М.: РКК «Энергия», 2011. 684 с.

9. Коротеев А.С., Семенов Ю.П., Сизенцев Г.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Сотников Б.И. Космическая техника и космонавтика в решении экологических проблем мировой энергетики XXI века // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 1. С. 142–155.

10. Дубкова С.И. Книга о Луне: фамильные тайны Солнечной системы. М.: Белый город, 2008. Серия: Энциклопедия тайн и загадок Вселенной. 200 с.

11. Шевченко В.В. Современная селенография. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1980. 288 с.

12. New views of the Moon reviews in mineralogy and geochemistry. Eds. B.L. Joliff, M.A. Wieczorek, C.K. Shearer, C.R. Neal. Reviews in mineralogy and geochemistry. Vol. 60. USA: Mineralogical Society of America, 2006. 721 p.

13. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия Телеком, 2010. 480 с.

14. Долгачева С.А., Цапков Ю.А. Обработка сигнала ЧМ-дальномера с использованием нейронных сетей // Вестник Волгоградского гос. унта. Сер. 1. Математика. Физика. 2010. Вып. 13. С. 107–112.

15. Lingling Wang, Li Fu, Xiaoguang Hu, Guofeng Zhang. Attitude estimation for UAV with low-cost IMU/ADS based on adaptive-gain complementary filter // Proc. 13th Intern. Symp. on Neural Networks. SPb. 2016. Pp. 346–355.

16. **Haykin S.** Neural network, a comprehensive foundation. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey, 1999. 842 p.

Статья поступила в редакцию 13.03.2017, принята к публикации 01.06.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИСЛИЦЫНА Ирина Александровна — научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21. irina_kislitsyna@mail.ru

МАЛЫХИНА Галина Федоровна — доктор технических наук, профессор кафедры «Измерительные информационные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

g_f_malychina@mail.ru

REFERENCES

[1] **V.M. Polyakov, V.P. Pokrovskiy, L.N. Soms,** Lazernyy peredayushchiy modul s pereklyuchayemoy diagrammoy napravlennosti dlya dalnomera kosmicheskogo apparata «Fobos-Grunt» [A laser transmitting module with a geared directional diagram for the "Fobos-Grunt" spacecraft's ranger], Opticheskiy Zhurnal. 78 (10) (2011) 4–9.

[2] **N.E. Zubov, D.V. Savchuk, E.I. Starovoytov,** Analiz vozmozhnostey, optimizatsii massy i energopotrebleniya lazernogo vysotomera dlya upravleniya spuskom s okololunnoy orbity [An opportunity analysis of optimization of mass and energy consumption of a laser altimeter for controlled descent from the near-earth orbit], Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 1 (4) (2014) 67–74.

[3] **V.V. Egorov**, Doplerovskiye radary posadki kosmicheskikh apparatov na Lunu i planety Solnechnoy sistemy [Doppler radars of spacecrafts's landings on the Moon and the planets of the planetary system], Sovremenniye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 9 (2) (2012) 145–151.

[4] Xiangyu Huang, Dayi Wang, Yingzi He, Yifeng Guan, Autonomous navigation and control for pin point lunar soft landing, Tralee: 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems. (2008) 1–7.

[5] V.S. Bilodeau, S. Clerc, R. Drai, J. de Lafontaine, Optical navigation system for pin point lunar landing, Preprints of the 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa. 24–29 August, 2014.

[6] **E.I. Yurevich,** TsNII RTK. Istoriya sozdaniya i razvitiya [TsNII RTK. The history of foundation and development], St. Petersburg, Izd-vo SPbPU, 1995.

[7] **E.I. Yurevich**, Fotonnaya tekhnika [Photonic technique], St. Petersburg, Izd-vo SPbPU, 2003.

[8] Luna – shag k tekhnologiyam osvoyeniya Solnechnoy sistemy [The Moon is the 1st step to technologies of the planetary system opening], Eds. V.P. Legostayev, V.A. Lopota, Moscow, RKK "Energy", 2011.

[9] A.S. Koroteyev, Yu.P. Semenov, G.A.

Received 13.03.2017, accepted 01.06.2017.

THE AUTHORS

KISLITSYNA Irina A.

State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC) 21 Tikhoretskiy Ave., Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation irina_kislitsyna@mail.ru

MALYKHINA Galina F.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation g_f_malychina@mail.ru

Sizentsev, et al., Kosmicheskaya tekhnika i kosmonavtika v reshenii ekologicheskikh problem mirovoy energetiki XXI veka [Space techniques and astronautics in the solving the ecological problems on the world energy of the 21th century], Izvestiya RAS, Energetika. (1) (2006) 142–155.

[10] **S.I. Dubkova,** Kniga o Lune: familnye tayni Solnechnoy sistemy [A book about the Moon: Family secrets of the planetary system], Moscow, Beliy gorod, 2008.

[11] **V.V. Shevchenko,** Sovremennaya selenografiya [Modern selenography], Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1980.

[12] New Views of the Moon Reviews in mineralogy and geochemistry. Eds. B.L. Joliff, M.A. Wieczorek, C.K. Shearer, C.R. Neal, Reviews in mineralogy and geochemistry, Mineralogical Society of America. 60 (2006).

[13] **A.I. Galushkin,** Neyronnyye seti: osnovy teorii [Neural networks: foundations of the theory], Moscow, Goryachaya liniya Telekom, 2010.

[14] **S.A. Dolgacheva, Yu.A. Tsapkov,** Obrabotka signala ChM-dalnomera s ispolzovaniye neyronnykh setey [FM-altimeter signal processing with the use of neural networks], Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. 1: Matematika, Fizika. (13) (2010) 107–112.

[15] Lingling Wang, Li Fu, Xiaoguang Hu, Guofeng Zhang, Attitude estimation for UAV with low-cost IMU/ADS based on adaptive-gain complementary filter, Proceedings of 13th International Symposium on neural networks, ISNN 2016, St. Petersburg, 346–355.

[16] **S. Haykin,** Neural network, a comprehensive foundation, 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey, 1999.