

РАДІОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ РАДІОЛОКАЦІЇ, РАДІОНАВІГАЦІЇ, ЗВ'ЯЗКУ І ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.212>

УДК 520.6.05, 523.3,
528.8

PACS numbers: 07.87.+V,
95.85.Bh, 96.20.-n

В. Г. ГАЛУШКО¹, В. В. ВІНОГРАДОВ¹, Ю. Г. ШКУРАТОВ^{1,2}

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України,
ул. Мистецтв, 4, г. Харків, 61002, Україна
E-mail: galushko@rian.kharkov.ua

² Научно-дослідницький інститут астрономії
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна,
ул. Сумська, 35, г. Харків, 61022, Україна

ПРОЕКТ СПУТНИКОВОГО РАДАРА МІЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ІССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Предмет и цель работы: Разработка и обоснование концепции построения спутникового радара миллиметрового диапазона для исследования поверхности Луны и оценка его параметров для работы в режимах активной локации, включая синтезирование апертуры, и пассивного радиометрического зондирования.

Методы и методология: Для картографирования поверхности Луны с высоким пространственным разрешением и поиска аномалий поля теплового излучения предлагается использовать спутниковый радар миллиметрового диапазона с возможностью синтеза апертуры бокового/переднебокового обзора.

Результаты: Предложены и обоснованы три режима работы спутникового локатора миллиметрового диапазона для исследования поверхности Луны. Рассмотренные режимы включают активное моностатическое зондирование поверхности Луны с довольно грубым пространственным разрешением (примерно 1400×1000 м), построение радиоизображения и восстановление рельефа лунной поверхности (или отдельных ее участков) с высоким разрешением (размер элемента разрешения $\leq 22 \times 25$ м) с применением алгоритмов синтеза апертуры бокового/переднебокового обзора и пассивное (радиометрическое) зондирование поля температур с разрешением примерно 1400×2000 м. Получены оценки основных параметров и мощности радара, необходимых для обеспечения достаточно высокого соотношения сигнал/шум в каждом из этих режимов.

Заключение: Эксперименты с помощью предложенного локатора позволят оценивать электрофизические и структурные параметры верхнего слоя реголита толщиной несколько сантиметров, определять отражающие свойства лунной поверхности и восстанавливать трехмерное изображение ее рельефа с высоким разрешением (несколько десятков метров), а также исследовать пространственное распределение и аномалии поля теплового излучения с целью поиска неоднородностей в строении лунной коры.

Ключевые слова: спутниковый локатор, синтезированная апертура, радиометрический режим, поверхность Луны, реголит

1. Введение

Научные результаты, полученные в ходе последних лунных автоматических миссий, стимулируют дальнейший интерес к нашему естественному спутнику – Луне. После серии разнообразных исследований, проведенных с помощью космических аппаратов (КА) “Лунный разведчик”

(“Lunar Reconnaissance Orbiter”) [1, 2], США; “Чандрайаан-1” (“Chandrayaan-1”) [3], Индия; “Чанге-3” (“Chang’e-3”) [4–7], Китай, и “Селена” (“Selene”) [8, 9], Япония, некоторые страны развивают амбициозные планы изучения Луны в широком научном и практическом контексте. Основная цель на период до 2040 г. – детальные исследования Луны и ее окружения с помощью зондов, использование Луны в качестве места для проведения астрофизических наблюдений и начало но-

© В. Г. Галушко, В. В. Виноградов, Ю. Г. Шкуратов, 2018

вых пилотируемых полетов, включая создание обитаемых лунных баз. Такие планы предлагались еще много лет назад [10] и продолжают обсуждаться в литературе [11]. Возобновление пилотируемых экспедиций на Луну может иметь большое значение, например, в контексте использования изотопа ^3He , который является весьма эффективным энергетическим ресурсом, в качестве топлива для термоядерного реактора [12, 13]. Лунная поверхность является естественной платформой для исследований в области радиоастрономии [14–20]. Благодаря незначительному влиянию слабой лунной ионосферы на распространение радиоволн, на Луне можно будет проводить радиоастрономические измерения на очень низких частотах (длины волн – сотни метров), которые невозможны с Земли. С учетом экранирования земных радиопомех, излучения молний и полярных сияний обратная сторона Луны представляет особый интерес для таких измерений.

Одним из наиболее эффективных методов исследования поверхности Луны и ее глубинной структуры является радиолокационное зондирование с борта лунного спутника в широком диапазоне частот от нескольких мегагерц до десятков гигагерц. Такое зондирование возможно благодаря низким значениям тангенса угла потерь лунных пород, что обусловлено отсутствием на Луне воды в жидком или газообразном состоянии. Глубина проникновения радиоволн может составлять в этом случае десятки и даже сотни длин волн. Проводя зондирование Луны в разных частотных диапазонах, можно получить горизонтальные “разрезы” глубинной структуры лунного грунта. Радарные измерения позволяют выполнить оценки химического состава и электрических свойств поверхностного слоя реголита, прогнозировать топографию подповерхностных слоев, создать глобальные карты шероховатости лунной поверхности и ее крупномасштабного рельефа с высоким разрешением.

В этом направлении уже много сделано. Например, в сентябре 2007 г. был запущен японский КА “Селена” [8, 9]. На его борту был установлен мощный (около 800 Вт) радар (длина волны приблизительно 60 м), позволявший зондировать лунный грунт до глубины 5 км с разрешением около 100 м. В октябре 2008 г. стартовала индийская лунная миссия “Чандрайаан-1” [3]. Бортовая научная аппаратура спутника, укомплектованная

в рамках международной кооперации, включала мини-радар синтезированной апертуры (mini-SAR) с пиковой мощностью около 40 Вт и рабочей частотой 2.38 ГГц. Одной из научных целей проекта являлось определение характеристик рассеяния лунной поверхности в полярных областях с пространственным разрешением около 150 м. К сожалению, 29 августа 2009 г. связь с аппаратом была потеряна. Аналогичный радар синтезированной апертуры (РСА) находился в составе бортовой аппаратуры спутника НАСА “Лунный разведчик”, запущенного почти годом позже, в июне 2009 г. [1, 2]. Целью миссии является поиск воды или льда в кратерах, находящихся в области постоянной тени. В декабре 2013 г. стартовала третья китайская лунная миссия “Чанге-3” (“Chang’e-3”) [4–7]. В составе бортовой аппаратуры был передвижной лунный модуль (луноход) “Юту” (“Yutu”), оборудованный радаром подповерхностного зондирования. Это была первая попытка исследования глубинной структуры грунта Луны непосредственно с ее поверхности. Радиолокатор работал на частотах 60 и 500 МГц с разрешением по дальности 3.75 и 0.3 м соответственно. Среди научных задач миссии было измерение толщины и слоистых образований лунного реголита и исследование геологической структуры лунной поверхности вдоль траектории движения модуля вблизи места посадки (северная часть Моря Дождей (Mare Imbrium)). К сожалению, из-за технических неполадок модуль преодолел всего 114 м в течение двух лунных дней [4]. Траектория его движения показана на рис. 1 [4]. Тем не менее полученные радаром данные свидетельствуют о наличии горизонтальных пластов лунного реголита, толщина которых меняется от 4 до 6 м [4], а также сильных эхосигналов от глубин порядка 300 м, которые авторы цитируемой работы связывают с отражением от горных пород (см. рис. 2 и рис. 3 соответственно).

Глобальные радарные исследования лунной поверхности проводились с Земли методом апертурного синтеза [21, 22]. В качестве примера на рис. 4, а приведено оптическое изображение кратера Аристилл [23], а на рис. 4, б – его радиолокационная карта, полученная на длине волны 12.6 см [24]. Стрелками указаны лавовые потоки с сильно шероховатой поверхностью, которые хорошо видны на радарном изображении, но лишь слабо прослеживаются на оптическом.

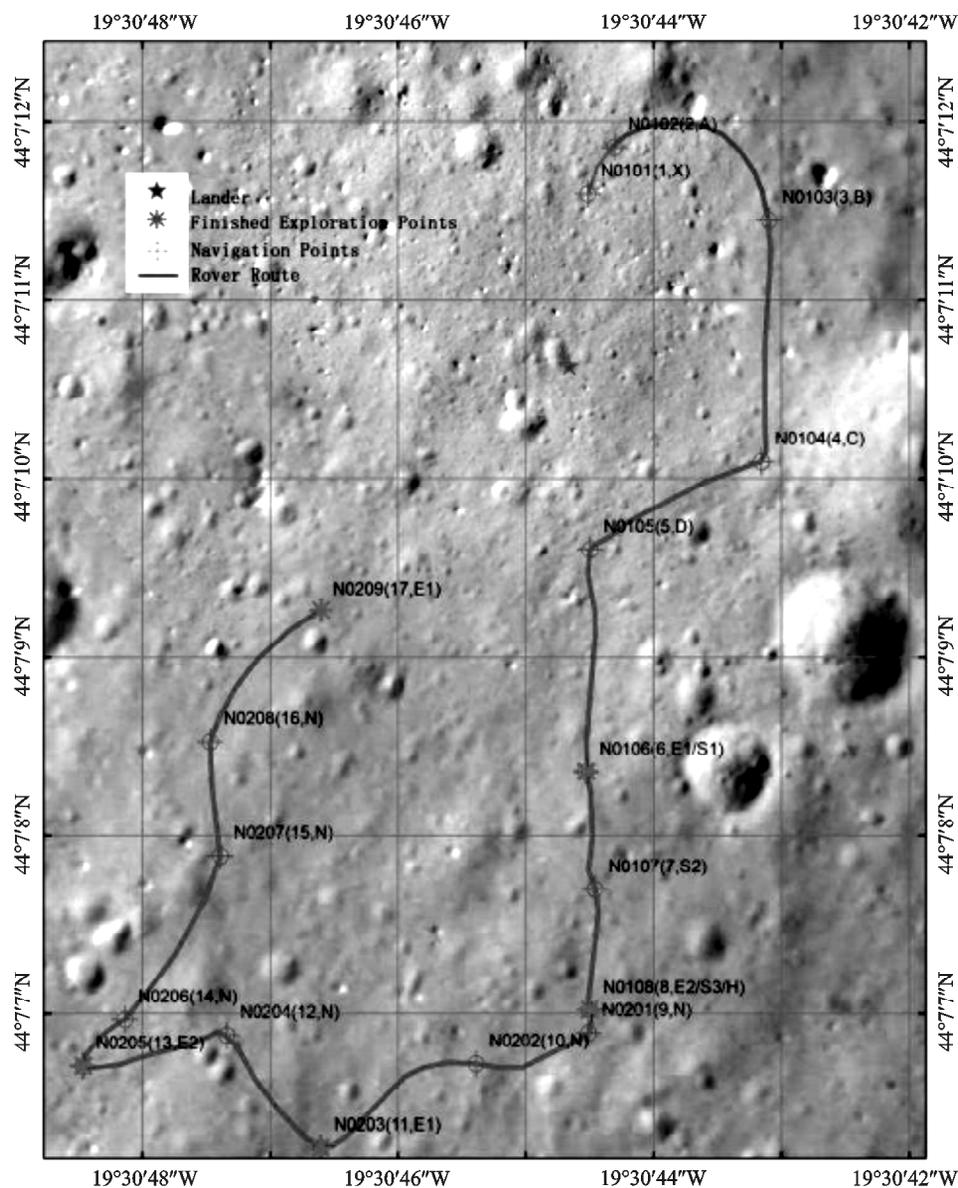


Рис. 1. Маршрут движения модуля “Юту” (“Yutu”) (темно-серая линия) [4]

Космическая радарная съемка Луны была сосредоточена на отдельных районах. В основном исследовались полярные зоны в надежде найти отложения льдов. Так, в работе [25] описаны результаты радарной съемки с помощью радара КА “Клементина” (“Clementine”), на основании которых был сделан вывод о присутствии льдов. Однако позднее более тщательный анализ полученных данных не подтвердил это предположение [26].

Проведенный анализ состоявшихся и текущих миссий показывает, что большинство локаторов

зондирования поверхности Луны предполагают использование довольно низких частот с целью увеличения глубины проникновения зондирующих сигналов в лунный грунт. Вместе с тем для корректного решения обратной задачи – оценки структурных и химико-минералогических характеристик лунной поверхности и приповерхностных слоев – необходим совместный анализ данных в широком диапазоне частот от коротковолнового до оптического. С этой точки зрения перспективным представляется зондирование лун-

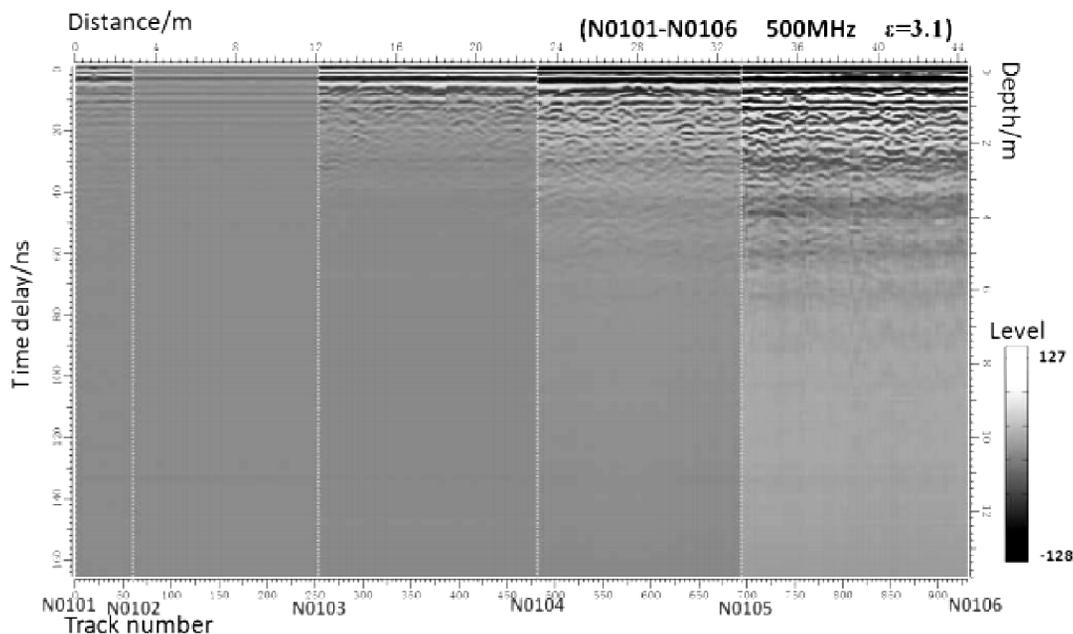


Рис. 2. Результаты зондирования лунного грунта на частоте 500 МГц для точек N0101 – N0106 траектории движения модуля “Юту” (“Yutu”) (см. рис. 1) [4]

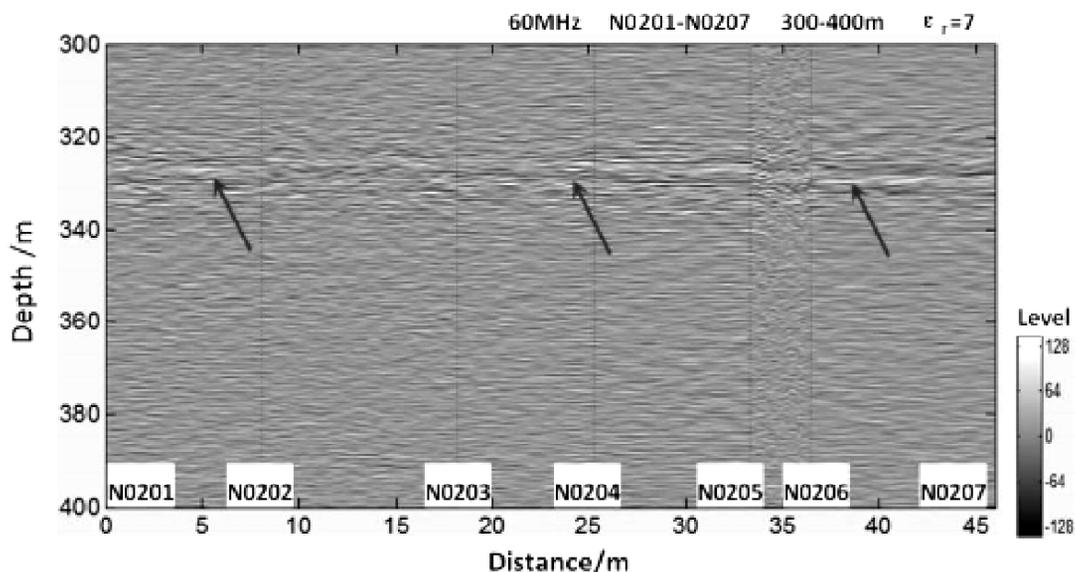
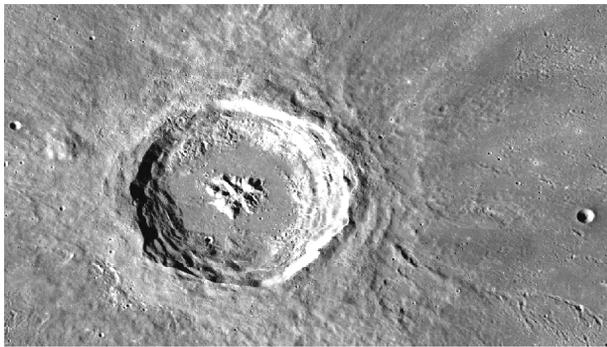


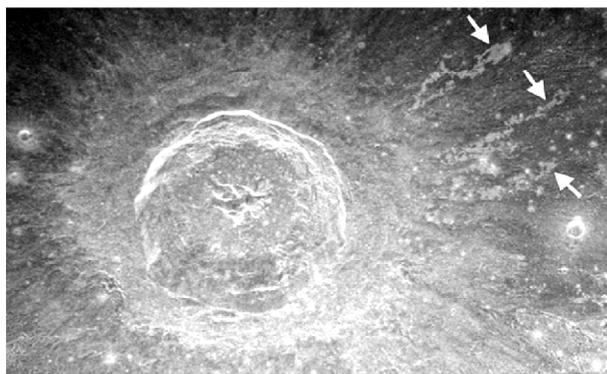
Рис. 3. Результаты зондирования лунного грунта на частоте 60 МГц для точек N0201 – N0207 траектории движения модуля “Юту” (“Yutu”) (см. рис. 1). Стрелками показаны сильные отражения от глубин примерно 330 м [4]

ной поверхности в миллиметровом диапазоне волн, который, в определенном смысле, является переходным между радиоволнами и оптическим излучением. Использование спутникового бортового локатора этого диапазона позволит, во-первых, восстанавливать трехмерный рельеф лун-

ной поверхности по методикам, изложенным, например, в работах [27–31], а во-вторых, оценивать параметры и структуру самого верхнего слоя реголита глубиной в несколько сантиметров. Поэтому в следующем разделе рассмотрены возможные задачи, которые могут быть решены



а



б

Рис. 4. Кратер Аристилл (диаметр 55 км, координаты 33.9°N, 1.2°E): *а* – оптическое изображение [23], *б* – радиолокационная карта того же участка, полученная на длине волны 12.6 см [24]. Север сверху

с помощью бортового радара, функционирующего в миллиметровом диапазоне, и приведены оценки требуемых для этого характеристик радиолокатора. Представляется очень заманчивым исследование лунной поверхности на двух частотах, соответствующих длинам волн 3 и 9 мм. Сопоставление радиоизображений на этих длинах волн позволит проводить более тонкий анализ состава и степени шероховатости лунного грунта на миллиметровых масштабах, чем в случае одночастотной радиолокации. Такой подход широко используется в оптических исследованиях Луны [32].

2. Радар миллиметровых волн для миссии “BRAUDE-M” и его задачи

В советское время Украина участвовала в пилотируемой лунной программе, которая, к сожалению, была отменена, когда СССР проиграл в лун-

ной гонке [33]. Украина производила модули для лунного посадочного комплекса (проект N1-L3). В частности, ракетный блок (Block-D), который предполагалось использовать пилотируемой лунной миссией Л3 для доставки и спуска на Луну обитаемого модуля, был успешно протестирован в 1960–70-х гг. (Космос-379, -382, -434 и -398). В настоящее время Украина имеет научно-технический потенциал для участия в перспективных международных лунных проектах, а также для реализации своих собственных лунных миссий. В начале 2000-х гг. рассматривался проект “Укрселена” для лунной разведки, который включал в себя выполнение радарной съемки в миллиметровом диапазоне длин волн [34, 35].

В этой статье мы рассматриваем возможность использования радара миллиметрового диапазона в двойной лунной миссии [19, 20], названной “BRAUDE-M” (Big Radio Astronomy Universe, Demonstrating Exploration on the Moon). Миссия включает исследование Луны с помощью: (1) спутника с вытянутой 5-часовой орбитой с перигеем над северным полюсом (100 км над поверхностью) и апоцентром над южным полюсом (высота около 3000 км) и (2) посадочного устройства, которое будет находиться на обратной стороне Луны у южного полюса в окрестностях кратера Брауде. Посадочный блок, оснащенный радиоастрономическими антеннами и другой научной аппаратурой, держит связь со спутником, который может исполнять функции ретранслятора. Орбитальный аппарат оснащен полезной нагрузкой для исследования поверхности Луны, включая двухчастотный радар миллиметрового диапазона, инфракрасный спектрометр для оценки обилия соединений OH/H₂O в лунном грунте и камеру HiRes, работающую в двух спектральных полосах для картирования структурных и минералогических характеристик молодых поверхностных образований.

С учетом опыта предыдущих лунных миссий представляется целесообразным использовать бортовой радиолокатор миллиметрового диапазона в трех режимах работы, а именно: (1) активная моностатическая локация лунной поверхности, (2) синтезирование апертуры бокового (переднебокового) обзора и (3) пассивный (радиометрический) режим. Это позволит, соответственно, оценивать электрофизические и структурные параметры [36] верхнего слоя реголита толщиной

несколько сантиметров со сравнительно грубым пространственным разрешением (около 1 км), определяемым диаграммой направленности радара, а также определять отражающие свойства лунной поверхности и восстанавливать трехмерное изображение ее рельефа с высоким разрешением (несколько десятков метров) [27–31]. Кроме того, возможны исследования пространственного распределения и аномалий поля теплового излучения с целью поиска неоднородностей в строении лунной коры и мантии [37].

Отраженный радиолокационный сигнал радара миллиметрового диапазона существенно зависит от рельефа лунной поверхности на масштабах >1 см, шероховатости поверхности условно на масштабах <1 см и эффективных диэлектрических постоянных материала поверхности. Физически отклик диэлектрических материалов, примером которых является вещество поверхности Луны, на падающую электромагнитную волну определяется смещениями связанных зарядов. Это могут быть электроны в атомах, ионы в кристаллических ячейках, объемные заряды в ловушках и дипольные структуры, реагирующие на внешнее поле изменением вектора своей поляризации. Миллиметровый диапазон длин волн в случае диэлектриков не содержит характерных полос поглощения. Он расположен между длинноволновыми крыльями ионных зон и коротковолновым крылом полосы, связанной с механизмами прыжковой поляризации.

Диэлектрическая постоянная лунного реголита $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, где ε' и ε'' – действительная и мнимая части, является эффективной величиной, т. е. она определяется не только свойствами материала, но также плотностью лунного реголита в масштабах значительно меньше 1 мм. Напомним, что средний размер частиц лунной поверхности составляет около 60 мкм, а ее пористость оценивается в среднем равной 0.5 [38]. Поверхностные неоднородности, сравнимые с длиной волны, создают диффузную составляющую диаграммы рассеяния. Если таких неоднородностей мало, а в больших масштабах поверхность ровная, то она рассеивает излучение квазизеркально [39]. Зеркальные и диффузные компоненты могут быть описаны с использованием теоретической модели или эвристически аппроксимированы подходящей функцией. Для иллюстративных целей здесь используется однопараметри-

ческая фазовая функция Хеньи–Гринштейна $\chi(\alpha) = (1 - g^2)(1 + g^2 + 2g \cos \alpha)^{-3/2}$ [40], где α – угол рассеяния, а g – параметр, характеризующий преобладающее направление рассеяния.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования рассеяния на шероховатых поверхностях с параметром шероховатости $\langle \text{tg}\theta \rangle$, связанным со среднеквадратичным наклоном неровностей поверхности [20]. Здесь мы применили упрощенную двухмасштабную модель неоднородностей [39], оценивая диффузную составляющую радиолокационного рассеяния с помощью функции Хеньи–Гринштейна с параметром g , равным 0, 0.5 и 0.95. Первое и последнее значения отвечают соответственно изотропному и квазизеркальному рассеянию. Лучевые траектории были построены с использованием метода, разработанного в [41, 42]. Мы рассматривали два типа модельных случайных шероховатых поверхностей. Первый из них описывался гауссовой статистикой высот и наклонов. Вторая модель характеризовалась такой же статистикой, но участки отрицательных высот в ней были заменены плоской поверхностью на нулевой высоте (см. вставку на рис. 5). Зависимости нормированного сигнала радара от характеристического наклона поверхности $\langle \text{tg}\theta \rangle$, рассчитанные для этих двух моделей, приведены на рис. 5. Наши оценки показывают, что основным фактором, влияющим на радиолокационное эхо, является шероховатость отражающей поверхности, т. е. изменения ее локальных наклонов. Таким образом, радарное картирование в миллиметровом диапазоне позволит обнаруживать области с высокой шероховатостью на масштабах больше нескольких сантиметров, что может соответствовать полям камней и скальных пород. Можно ожидать, что радиолокационные изображения в миллиметровом диапазоне будут подобны показанному на рис. 4, б. Однако могут наблюдаться и важные отличия, поскольку спектральные диапазоны существенно разные. Такого рода изображения (карты) важны для выбора безопасных мест для лунной посадки КА, особенно аппаратов небольших размеров.

Особого внимания заслуживает возможность двухчастотного зондирования лунной поверхности, например, на длинах волн 3 и 9 мм. Благодаря отсутствию характеристических полос поглощения в этой области, отличия таких радиоизобра-

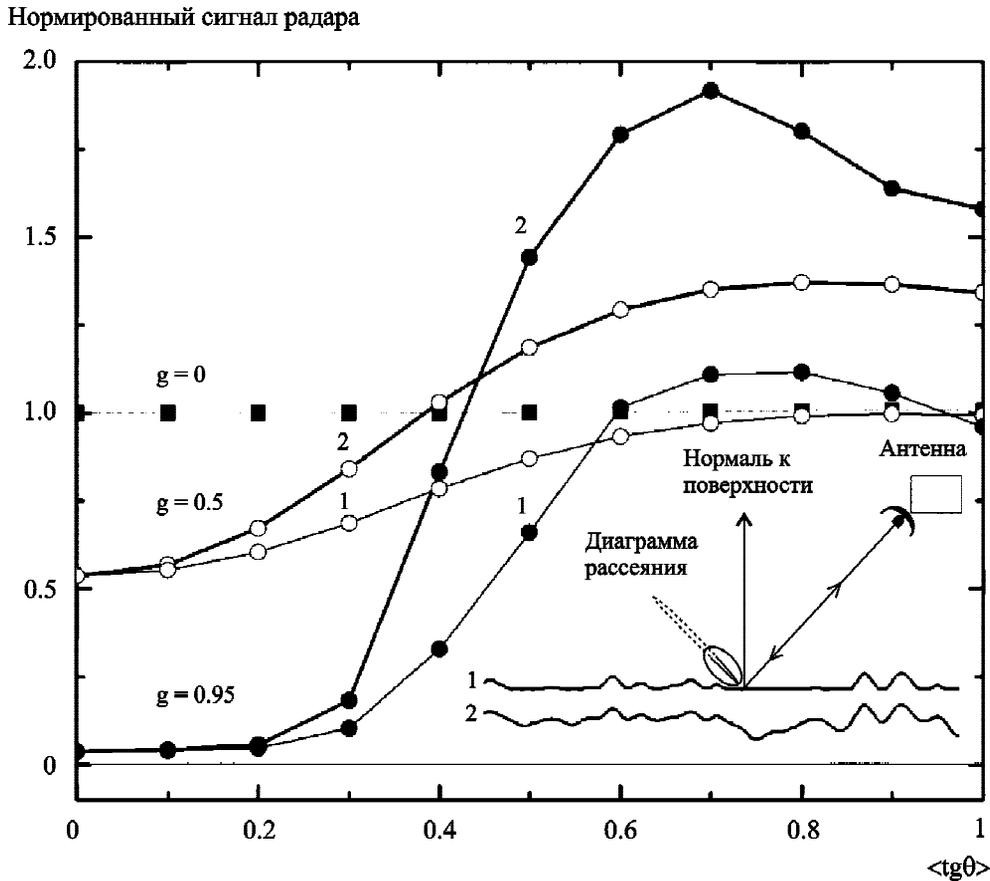


Рис. 5. Нормированный радиолокационный сигнал в зависимости от параметра $\langle \text{tg}\theta \rangle$, характеризующего шероховатость отражающей поверхности, для двух моделей статистики неровностей (модели 1 и 2) и трех значений параметра g в функции Хеньи–Гринштейна, равных 0, 0.5 и 0.95

жений можно будет связать с вариациями параметров шероховатости поверхности для этих двух длин волн.

3. Характеристики радара миллиметрового диапазона

Для анализа работы локатора в указанных выше режимах и оценки его характеристик положим высоту орбиты спутника $H_s \approx 100$ км, скорость полета $V_s \approx 1700$ м/с, длину волны радара $\lambda \approx 3$ мм. Излучаемая импульсная мощность – 1 Вт. Шум-фактор приемного устройства F_n зададим равным $5 \div 6$ дБ (с учетом потерь в высокочастотном тракте), что соответствует шумовой температуре T_n порядка 1000 К. Излучение и прием сигналов осуществляется на одну антенну (волноводно-щелевая либо микрополосковая) с круговой апертурой диаметром $d_a = 0.3$ м. Ориентацию диаграммы направленности антен-

ны будем характеризовать углами φ_a (азимут) и θ_a (угол визирования), отсчитываемых соответственно от направления движения и вертикали (см. рис. 6).

Импульсное моностатическое зондирование. В случае достаточно узкой диаграммы направленности антенны, $\Delta_a \approx \lambda/d_a \ll 1$, освещаемая ею область поверхности имеет форму эллипса с осями

$$\rho_{\perp} \approx \frac{H_s \lambda}{d_a \cos \theta_a} \quad \text{и} \quad \rho_{\parallel} \approx \frac{H_s \lambda}{d_a \cos^2 \theta_a}. \quad (1)$$

Размер элемента разрешения исследуемой поверхности вдоль луча зрения (по дистанции) Δ_{\parallel} равен меньшему из значений, определяемых диаграммой направленности в угломестной плоскости ρ_{\parallel} и длительностью зондирующего импульса τ_p , $\rho_p = \frac{c \tau_p}{2 \sin \theta_a}$ (c – скорость света), т. е.

$$\tau_p = \frac{H_s \lambda \operatorname{tg} \theta_a}{cd_a \cos \theta_a}, \quad (7)$$

откуда определяем необходимую полосу приемника

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_p} = \frac{cd_a \cos \theta_a}{H_s \lambda \operatorname{tg} \theta_a}. \quad (8)$$

В принципе, при оценке Δf необходимо учитывать доплеровское уширение спектра зондирующего импульса ΔF , которое примерно равно разности максимального $F_{D_{\max}}$ и минимального $F_{D_{\min}}$ значений доплеровского смещения частоты. Однако несложно показать, что для выбранных параметров задачи $\Delta F / \Delta f \ll 1$ и данным эффектом можно пренебречь. Так, например, в случае строго бокового обзора ($\varphi_a = \pi/2$), при котором ΔF максимально, с учетом малости отношения λ/d_a можно записать

$$\Delta F \approx 2V_s/d_a. \quad (9)$$

Разделив (9) на (8) и подставив выражения для параметров, получим

$$\begin{aligned} \Delta F / \Delta f &= \frac{cd_a^2 \cos^2 \theta_a}{2V_s H_s \lambda \sin \theta_a} \\ &= \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0.09 \cos^2 45^\circ}{2 \cdot 1700 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \sin 45^\circ} \approx 0.05. \end{aligned}$$

Заметим, что формула (5) записана для одиночного импульса. Некогерентное накопление N импульсов позволяет увеличить соотношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз. При движении спутника по орбите освещаемое диаграммой направленности “пятно” на поверхности Луны перемещается с той же скоростью. Максимальная ширина полосы обзора обеспечивается при $\varphi_a = \pi/2$ (строго боковой обзор, см. рис. 6). Расстояние ρ_\perp спутник пролетит за время $t_\perp = \rho_\perp / V_s$, а количество накопленных за это время импульсов будет равно

$$N = t_\perp f_{rep} = \rho_\perp f_{rep} / V_s, \quad (10)$$

где f_{rep} – частота следования (повторения) импульсов.

Таким образом, данную процедуру некогерентного накопления импульсов можно рассматривать как сглаживание радиолокационного порт-

рета поверхности пространственным фильтром шириной ρ_\perp . Частота f_{rep} выбирается из условия однозначного определения расстояния до каждого элемента разрешения, которое с учетом фильтрующих свойств диаграммы направленности антенны локатора можно записать в виде

$$\frac{1}{f_{rep}} \equiv T_{rep} \geq \frac{2(R_{\max} - R_{\min})}{c} + 2\tau_p, \quad (11)$$

где T_{rep} – период следования импульсов, а R_{\max} и R_{\min} – максимальное и минимальное расстояние до облучаемого радаром участка поверхности соответственно (см. рис. 6). Полагая $R_{\max} \leq 150$ км и $R_{\min} \geq 130$, что с запасом выполняется для выбранной геометрии зондирования поверхности, положим $f_{rep} = 1$ кГц. Тогда, подставив (7) в (5) (не забыв при этом коэффициент $1/2$, связанный с уменьшением площади элемента разрешения S_r), получим

$$\mu = \frac{\pi^2 P_p d_a \sigma_0 \lambda \sqrt{N} \operatorname{tg} \theta_a}{512 c H_s k T F_n \Gamma_\Sigma}, \quad (12)$$

где N определяется выражением (10).

Значение σ_0 для лунной поверхности зададим равным 0.1 в соответствии с данными Государственного стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 25645.161 94 [44]. Из-за отсутствия атмосферы на Луне суммарные потери Γ_Σ будут определяться главным образом потерями при обработке (потери в высокочастотном тракте учтены шум-фактором приемника F_n). Поэтому для оценок зададим $F_n \Gamma_\Sigma = 10$ дБ. Тогда для выбранных параметров задачи, учитывая, что $kT = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, из (12) получаем $\mu \approx 16$ дБ. При радиолокационном картографировании требуется, чтобы отраженная от элемента разрешения мощность на $10 \div 20$ дБ превышала мощность шумов приемника, т. е. $\mu \geq 10 \div 20$ дБ. Таким образом, можно надеяться на получение в режиме моностатического импульсного зондирования качественного радиоизображения лунной поверхности с пространственным разрешением примерно 1400 на 1000 м. Основные характеристики радара в этом режиме приведены в табл. 1.

Заметим, что соотношение сигнал/шум μ может быть повышено за счет применения более сложных зондирующих сигналов, например, импульсов с линейной частотной модуляцией несущей

Таблица 1. Основные характеристики моностатического режима обзора

Параметры спутника	
Высота орбиты H_s , км	100
Скорость V_s , м/с	1700
Параметры локатора	
Импульсная мощность P_p , Вт	1
Длина волны λ , мм	3
Шум-фактор приемника, дБ	≤ 6
Вес (вместе с антенной), кг	< 10
Зондирующий сигнал	
Прямоугольный импульс	
Длительность импульса τ_p , мкс	4.7
Частота повторения, Гц	1000
Антенна	
Волноводно-щелевая или микрополосковая с круговой апертурой.	
Диаметр апертуры d_a , см	30
Режим обзора поверхности	
Боковой	$\varphi_a = 90^\circ$
Угол визирования θ_a	45°
Ширина полосы обзора, м	2000
Пространственное разрешение элементов поверхности	
Вдоль луча зрения $\Delta_{ }$, м	1000
Поперек луча зрения Δ_{\perp} , м	~ 1400
Соотношение сигнал/шум	
Для одиночного импульса, дБ	≥ 1.4

щей (ЛЧМ-импульсов) [43]. В этом случае, при том же пространственном разрешении $\Delta_{||}$, которое определяется полосой сигнала Δf , можно увеличить длительность зондирующего ЛЧМ-импульса τ_{chirp} , а следовательно, и эффективную излучаемую мощность локатора. При этом следует помнить, что при использовании одной приемо-передающей антенны максимальная длительность излучаемого сигнала ограничена условием

$$\tau_{chirp}^{\max} \leq 2R_{\min}/c. \quad (13)$$

В принципе, таким образом можно также существенно улучшить пространственное разрешение вдоль луча зрения $\Delta_{||}$. Однако это имеет смысл при работе в режиме синтезирования апертуры, который будет рассмотрен ниже.

Режим синтезирования апертуры бокового обзора предназначен для получения детального (с высоким разрешением) радиолокационного

изображения рельефа лунной поверхности или отдельных ее участков. Рассмотрим простейший случай синтезирования апертуры, так называемый режим доплеровского обужения луча [45]. При строго боковом обзоре, $\varphi_a = 90^\circ$ (см. рис. 6), в пренебрежении кривизной лунной поверхности пространственное разрешение поперек луча зрения (по азимуту) Δ_{\perp} определяется размером синтезированной апертуры L_s :

$$\Delta_{\perp} = \frac{\lambda R}{L_s}. \quad (14)$$

Очевидно, что в нашем случае

$$L_s = V_s T_s, \quad (15)$$

где T_s – время синтезирования апертуры. Максимальная длина апертуры ограничивается условием работы РСА в дальней зоне [46]

$$L_s \leq \sqrt{\lambda R_{\min}}, \quad (16)$$

где R_{\min} – расстояние до ближней границы полосы обзора (см. рис. 6).

При $\theta_a = 45^\circ$ для заданных параметров задачи $R_{\min} \approx 140$ км, а $R_{\max} \approx 143$ км. Тогда, в соответствии с (16), имеем $L_s \approx 20.5$ м, а из (14) определяем максимальный $\Delta_{\perp \max}$ и минимальный $\Delta_{\perp \min}$ размер элемента разрешения по азимуту:

$$\Delta_{\perp \max} = \frac{\lambda R_{\max}}{L_s} \approx 20.9 \text{ м и } \Delta_{\perp \min} = \frac{\lambda R_{\min}}{L_s} \approx 20.5 \text{ м.}$$

Пространственное разрешение вдоль луча зрения $\Delta_{||}$ целесообразно выбрать такого же порядка, например, будем полагать $\Delta_{||} = 25$ м. В соответствии с (6) необходимая длительность зондирующего импульса должна быть

$$\tau_p = \frac{2\Delta_{||} \sin \theta_a}{c},$$

откуда при $\theta_a = 45^\circ$ получаем $\tau_p \approx 117.8$ нс. Соответственно, ширина полосы сигнала $\Delta f = 1/\tau_p \approx 8.5$ МГц.

Оценим теперь энергетический потенциал локатора. Как уже отмечалось, для повышения соотношения сигнал/шум (повышения энергетического потенциала радара) можно использовать ЛЧМ-сигналы [43, 46]. В этом случае эффективная мощность сжатого импульса P_{chirp} увеличи-

вається в $q = \tau_{chirp} / \tau_p$ раз, где τ_{chirp} – длительность ЛЧМ-сигнала. Пространственное же разрешение Δ_{\parallel} по-прежнему будет определяться полосой сигнала $\Delta f = 1/\tau_p$. При синтезировании апертуры происходит когерентное накопление импульсов, отраженных от элемента разрешения, за время синтезирования апертуры T_s , определяемое из (15). Площадь элемента разрешения S_r оценивается как $S_r \approx \Delta_{\perp} \Delta_{\parallel}$, а количество отраженных от него за время T_s импульсов N равно целой части произведения $T_s f_{rep}$, т. е. $N = [T_s f_{rep}]$. При выборе частоты следования импульсов f_{rep} , кроме выполнения условий (11) и (13), следует исходить из того, что она должна быть достаточно высокой для корректного восстановления спектра принимаемого сигнала. Согласно теореме Найквиста, в случае цифровой обработки квадратурных компонент узкополосного сигнала частота дискретизации должна быть не меньше полосы сигнала $\Delta F \approx 2V_s/d_a$ (см. (9)). Следовательно, для периода повторения импульсов получаем следующее условие:

$$\frac{d_a}{2V_s} \geq T_{rep} \geq \frac{2(R_{max} - R_{min})}{c} + 2\tau_{chirp}.$$

Поскольку $\rho_{\parallel} \ll H_s$, для величины $\Delta R = R_{max} - R_{min}$ можно приближенно записать (см. рис. 6)

$$\Delta R \approx \frac{H_s \rho_{\parallel}}{R} \approx \frac{H_s^2 \lambda}{R d_a \cos^2 \theta_a}.$$

Таким образом, условие выбора T_{rep} :

$$\frac{d_a}{V_s} \geq T_{rep} \geq \frac{2R\lambda}{c d_a} + 2\tau_{chirp}.$$

Для повышения средней излучаемой мощности длительность зондирующего импульса следует выбирать близкой к максимальной τ_{chirp}^{max} , значение которой ограничено неравенством (13), $\tau_{chirp}^{max} < 2R_{min}/c \approx 92.67$ мкс. Проанализировав эти условия для заданных параметров задачи, зададим следующие значения T_{rep} и τ_{chirp} :

$$T_{rep} = 200 \text{ мкс} \quad \text{и} \quad \tau_{chirp} = 90 \text{ мкс}.$$

Заметим также, что через время $t \approx \rho_{\perp}/V_s$ после начала синтезирования апертуры каждый элемент разрешения будет наблюдаться $M \approx \rho_{\perp}/\Delta_{\perp}$ раз

под разными ракурсами, что соответствует режиму многовзглядового PCA (multi-look SAR). Некогерентное усреднение полученных изображений позволит, во-первых, увеличить соотношение сигнал/шум примерно в \sqrt{M} раз, а во-вторых, существенно уменьшить влияние спекл-шумов (speckle noise).

С учетом этого и выражения (4) формулу (3) для соотношения сигнал/шум в режиме синтезирования апертуры можно записать следующим образом:

$$\mu = \frac{\pi P_p q d_a^4 \Delta_{\perp} \Delta_{\parallel} \sigma_0 N \sqrt{M} \cos^4 \theta_a}{64 \lambda^2 H_s^4 k T \Delta f F_n \Gamma_{\Sigma}}. \quad (17)$$

Тогда для заданных параметров задачи из (17) получаем $\mu \approx 17.7$ дБ, что соответствует условию качественного картографирования $\mu \geq 10 \div 20$ дБ. Тем не менее, анализируя (17), можно предложить три способа увеличения соотношения сигнал/шум μ . Наиболее очевидный из них заключается в увеличении импульсной мощности передатчика при сохранении разрешающей способности локатора. Второй способ состоит в применении антенн с большей эффективной площадью. Так, при $d_a = 60$ см получаем $\mu \approx 29$ дБ. Однако в этом случае соответственно сузится полоса обзора (в два раза). Следует заметить, что, в принципе, можно вместо круговой апертуры применить, например, прямоугольную, вытянутую вдоль направления синтезирования с тем, чтобы сохранить ширину полосы обзора. Третий способ, менее очевидный, заключается в увеличении размера Δ_{\parallel} элемента разрешения. При этом произведение $q \Delta_{\parallel}$ не изменится, а Δf уменьшится, что приведет к соответствующему увеличению μ . Этот вариант представляется наименее приемлемым, т. к. поперечный, Δ_{\perp} , и продольный, Δ_{\parallel} , размеры элемента разрешения будут сильно отличаться. Возможно, оптимальным является использовать комбинацию этих способов.

Для восстановления трехмерного рельефа лунной поверхности можно воспользоваться одним из методов, предложенных в работах [27–31]. Однако следует отметить, что для реализации интерферометрического режима синтезирования апертуры [30, 31] необходимо использовать две идентичные приемные антенны или создать эффективную “интерферометрическую базу” за счет нескольких пролетов спутника при контро-

лируемом изменении параметров орбиты (“great track interferometer”) [47].

Пассивный режим предназначен для исследования пространственного распределения и поиска аномалий поля теплового излучения с целью обнаружения глобальных и локальных неоднородностей в строении лунной коры и мантии. В этом режиме передатчик локатора выключен, а приемник регистрирует собственное излучение лунной поверхности. Как и в случае активной моностатической локации, рассмотренном выше, пространственное разрешение определяется диаграммой направленности антенны локатора, а за счет движения спутника происходит сглаживание поля температур пространственным фильтром шириной ρ_{\perp} , определяемой выражением (1). Как известно [48], чувствительность радиометра ΔT , т. е. минимальное изменение температуры, которое может измерить аналоговый радиометр, определяется выражением

$$\Delta T = \alpha T_n / \sqrt{\Delta f t_{\text{int}}}, \quad (18)$$

где α – некий коэффициент порядка единицы, зависящий от схемы радиометра; T_n – шумовая температура приемника; Δf – полоса пропускания; t_{int} – время интегрирования. Величина $\gamma = \sqrt{\Delta f t_{\text{int}}}$ называется радиометрическим выигрышем.

В работе [49] показано, что в случае использования радиометра прямой оцифровки (direct-sampling radiometer) с достаточно большим количеством разрядов аналого-цифрового преобразователя формула (18) может быть записана в виде

$$\Delta T = \alpha T_n \sqrt{\frac{2}{N}}, \quad (19)$$

где N – количество дискретных отсчетов сигнала.

Если частота дискретизации равна частоте Найквиста, то $N = 2\Delta f t_{\text{int}}$. Таким образом, выражения (18) и (19) аналогичны. Следовательно, чувствительность радиометра прямой оцифровки такая же, как и у аналогового. Положив интервал интегрирования t_{int} равным времени пролета спутником расстояния ρ_{\perp} , т. е. $t_{\text{int}} = \rho_{\perp} / V_s$, и $\alpha \approx 1$, получим

$$\Delta T \approx T_n \cdot \sqrt{\frac{V_s}{\Delta f \rho_{\perp}}}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что для обеспечения $\Delta T \leq 0.1$ К (такая точность вполне достаточна для большинства геофизических исследований) при заданных выше параметрах необходимо иметь полосу приемника $\Delta f \geq 43.3$ МГц.

4. Заключение

Таким образом, в работе проведен обзор некоторых лунных миссий, в рамках которых выполнялось радиолокационное зондирование. С учетом опыта предыдущих лунных радарных исследований предложены три возможных варианта зондирования лунной поверхности с помощью локатора миллиметрового диапазона, установленного на борту спутника. Рассмотренные режимы предполагают активное моностатическое зондирование поверхности Луны с довольно грубым пространственным разрешением (примерно 1400×1000 м), построение радиоизображения и восстановление рельефа лунной поверхности (или отдельных ее участков) с высоким разрешением (размер элемента разрешения $\leq 22 \times 25$ м) с применением алгоритмов синтеза апертуры и пассивное (радиометрическое) зондирование поля температур с разрешением примерно 1400×2000 м. Сделаны оценки энергетических возможностей локатора, необходимых для обеспечения достаточно высокого соотношения сигнал/шум в каждом из этих режимов.

Проведение таких измерений позволит оценивать электрофизические и структурные параметры верхнего слоя реголита толщиной несколько сантиметров, определять отражающие свойства лунной поверхности и восстанавливать трехмерное изображение ее рельефа с высоким разрешением (несколько десятков метров), а также исследовать пространственное распределение и аномалии поля теплового излучения с целью поиска неоднородностей в строении лунной коры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller J. W., Petro N. E., Vondrak R. R., and the LRO team. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission – Six years of science and exploration at the Moon. *Icarus*. 2016. Vol. 273. P. 2–24. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.11.024
2. Vondrak R. R., Keller J. W., and Russell C. T., eds. *Lunar Reconnaissance Orbiter Mission*. New York: Springer, 2010. 302 p.
3. Goswami J. N. and Annadurai M. Chandrayaan-1: India’s first planetary science mission to the Moon. *Current Science*. 2009. Vol. 96, No. 4. P. 486–491.

4. Yan Su, Guang-You Fang, Jian-Qing Feng, Shu-Guo Xing, Yi-Cai Ji, Bin Zhou, Yun-Ze Gao, Han Li, Shun Dai, Yuan Xiao, and Chun-Lai Li. Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. *Res. Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 14, No. 12. P. 1623–1632. DOI: 10.1088/1674-4527/14/12/010
5. Guang-You Fang, Bin Zhou, Yi-Cai Ji, Qun-Ying Zhang, Shao-Xiang Shen, Yu-Xi Li, Hong-Fei Guan, Chuan-Jun Tang, Yun-Ze Gao, Wei Lu, Sheng-Bo Ye, Hai-Dong Han, Jin Zheng, and Shu-Zhi Wang. Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission. *Res. Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 14, No. 12. P. 1607–1622. DOI: 10.1088/1674-4527/14/12/009
6. Jin Weidong, Zhang Hao, Yuan Ye, Yang Yazhou, Lucey Paul, Shkuratov Yuriy, Kaydash Vadim, Zhu Meng-Hua, Xue Bin, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, and Wang Ziwei. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, Is. 20. P. 8312–8319. DOI: 10.1002/2015GL065789
7. Zhang Hao, Yang Yazhou, Jin Weidong, Yuan Ye, Lucey Paul, Zhu Meng-Hua, Kaydash Vadim, Shkuratov Yuriy, Di Kaichang, Wan Wenhui, Xu Bin, Xiao Long, Wang Ziwei, and Xue Bin. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, Is. 17. P. 6945–6950. DOI: 10.1002/2015GL065273
8. Shin-ichi Sobue, Hayato Okumura, Susumu Sasaki, Manabu Kato, Hironori Maejima, Hiroyuki Minamino, Satoru Nakazawa, Hisashi Otake, Naoki Tateno, Hisashi Konishi, Katsuhide Yonekura, Hoshino Hirokazu, and Jun Kimura. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SELENE). *Proceedings of the 40th Lunar Planet. Sci. Conf.* (March 23–27, 2009). Houston, Texas, USA, 2009. id. 1224.
9. Ono T. and Oya H. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth Planets Space.* 2000. Vol. 52, No. 9. P. 629–637. DOI: 10.1186/BF03351671
10. Vaniman D., French B., and Heiken G. Chapter 11. Afterword. *Lunar Sourcebook*. G. H. Heiken, D. T. Vaniman, B. M. French, eds. New York: Cambridge University Press, 1991. P. 633–641.
11. Schmitt H. H. *Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space*. New York: Copernicus books, Springer-Verlag, 2006. 336 p. DOI: 10.1007/0-387-31064-9
12. Wittenberg L., Santarius J., and Kulchinski G. Lunar source of ^3He for commercial fusion power. *Fusion Technol.* 1986. Vol. 10, No. 2. P. 167–178. DOI: 10.13182/FST86-A24972
13. Taylor L. A. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances. *Engineering, Construction, and Operations in SPACE IV. Proceedings of Space '94*. New York: ASCE Publ., 1994. Vol. 1. P. 678–686.
14. Burns J. O., Duric N., Taylor G. J., and Johnson S. W. Observatories on the Moon. *Sci. Amer.* 1990. Vol. 262, No. 3. P. 18–25. DOI: 10.1038/scientificamerican0390-42
15. Crawford I. A. and Zarnecki J. Astronomy from the Moon. *Astron. Geophys.* 2008. Vol. 49, Is. 2. P. 2.17–2.19. DOI: 10.1111/j.1468-4004.2008.49217.x
16. Jester S. and Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.* 2009. Vol. 53. P. 1–26. DOI: 10.1016/j.newar.2009.02.001
17. Mimoun D., Weiczorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H., Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné P., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan G., and Zarka P. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.* 2012. Vol. 33. P. 529–585. DOI:10.1007/s10686-011-9252-3
18. Crawford I. A. and Joy K. H. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2014. Vol. 372, Is. 2024. id. 20130315. DOI: 10.1098/rsta.2013.0315
19. Шкуратов Ю. Г., Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Станіславський О. О., Баннікова О. Ю., Кайдаш В. Г., Станкевич Д. Г., Корохін В. В., Ваврив В. М., Галушко В. Г., Єрін С. М., Бубнов І. М., Токарський П. Л., Ульянов О. М., Степкін С. В., Литвиненко Л. М., Яцків Я. С., Вайдін Г., Зарка Ф., Рукер Х. Українська місія на Місяць: Цілі та корисне навантаження. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 1. С. 3–30. DOI: 10.15407/knit2018.01.003
20. Shkuratov Y. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S., Videen G., Zarka P., and Rucker H. O. A twofold mission to the Moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica*. 2018. (принята к публикации). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
21. Thompson T. W. High-resolution lunar radar map at 70-cm wavelength. *Earth, Moon, Planets.* 1987. Vol. 37, Is. 1. P. 59–70. DOI: 10.1007/BF00054324
22. Zisk S. H., Pettengill G. H., and Catuna G. W. High-resolution radar maps of the lunar surface at 3.8-cm wavelength. *The Moon.* 1974. Vol. 10, Is. 1. P. 17–50. DOI: 10.1007/BF00562017
23. ART-REACT-Quickmap. 2018. URL: <http://target.lroc.asu.edu/q3> (дата обращения: 6.07.2018).
24. Campbell B. A., Carter L. M., Campbell D. B., Nolan M., Chandler J., Ghent R. R., Hawke B. R., Anderson R. F., and Wells K. Earth-based 12.6-cm wavelength radar mapping of the Moon: New views of impact melt distribution and mare physical properties. *Icarus.* 2010. Vol. 208, Is. 2. P. 565–573. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.011
25. Nozette S., Lichtenberg C. L., Spudis P., Bonner R., Ort W., Malaret E., Robinson M., and Shoemaker E. M. The Clementine bistatic radar experiment. *Science.* 1996. Vol. 274, Is. 5292. P. 1495–1498. DOI: 10.1126/science.274.5292.1495
26. Simpson R. A. and Tyler G. L. Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole. *J. Geophys. Res. Planets.* 1999. Vol. 104, No. E2. P. 3845–3862. DOI: 10.1029/1998JE900038
27. Bezvesilnyy O. O., Dukhopelnykova I. V., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using

- a single-antenna squint-mode airborne SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. Vol. 45, No. 11. P. 3574–3582. DOI: 10.1109/TGRS.2007.902963
28. Leberl F. W. *Radargrammetric image processing*. Boston, MA: Artech House, 1990. 700 p.
29. Yocky D. A., Wahl D. E., and Jakowarz C. V. (Jr.). Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004. Vol. 42, No. 2. P. 301–308. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817683
30. Zebker H. A. and Goldstein R. M. Topographic mapping from interferometric SAR observations. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, No. B5. P. 4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993
31. Bamler R. and Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 1998. Vol. 14, No. 4. P. R1–R54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001
32. Shkuratov Y., Kaydash V., Korokhin V., Velokodsky Y., Oranasenko N., and Videen G. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet. Space Sci.* 2011. Vol. 59, Is. 13. P. 1326–1371. DOI: 10.1016/j.pss.2011.06.011
33. Черток Б. Е. *Ракеты и люди. Лунная гонка*. Т. 4. Москва: Машиностроение, 1999. 538 с.
34. Shkuratov Y., Lytvynenko L., Shulga V., Yatskiv Y., Vidmachenko A., and Kislyuk V. Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon. *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 31, No. 11. P. 2341–2345. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00534-9
35. Шкуратов Ю. Г., Кислюк В. С., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Модель Луны 2004 для проекта “Укрселена”. *Космічна наука і технологія. Додаток*. 2004. Т. 10, № 2. 51 с. DOI: 10.15407/knit2004.02s.003
36. Бондаренко Н. В., Шкуратов Ю. Г. Карта толщины реголитового слоя видимого полушария Луны по радиолокационным и оптическим данным. *Астрономический вестник*. 1998. Т. 32, № 4. С. 301–309.
37. Алифанов О. М., Анфимов Н. А., Беляев В. С., Бодин Б. В., Боярчук А. А., Захаров А. И., Зацепин В. И., Милюков В. К., Панасюк М. И., Поповкин В. А., Прохоров М. Е., Хартов В. В., Черепашук А. М., Шевченко В. В., Шустов Б. М. *Фундаментальные космические исследования. Книга 2: Солнечная система*. Под ред. Г. Г. Райкунова. Москва: Физматлит, 2014. 456 с.
38. McKay D., Heiken G., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B., and Papike J. Chapter 7. The Lunar Regolith. *Lunar source book: A user's guide to the Moon*. G. H. Heiken, D. T. Vaniman, and B. M. French, eds. New York: Cambridge University Press, 1991. P. 285–356.
39. Басс А. Г., Фукс И. М. *Рассеяние волн на статистически неровной поверхности*. Москва: Наука, 1972. 424 с.
40. Henyey L. C. and Greenstein J. L. Diffuse radiation in the Galaxy. *Astrophys. J.* 1941. Vol. 93. P. 70–83. DOI: 10.1086/144246
41. Stankevich D. and Shkuratov Y. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2004. Vol. 87, Is. 3-4. P. 289–296. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.014
42. Shkuratov Y. G., Stankevich D. G., Petrov D. V., Pinet P. C., Cord A. M., Daydou Y. H., and Chevrel S. D. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter. *Icarus*. 2005. Vol. 173, Is. 1. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.12.017
43. Scolnik M. I. *Radarg Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989. 1200 p.
44. Поверхности Луны, Марса и Венеры. Радиофизические параметры. *Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 25645.161–94*. Москва: Издательство стандартов, 1995. 22 с.
45. Kingsley S. and Quegan S. *Understanding Radar Systems*. New Jersey: SciTech Publishing, Inc., 1999. 375 p.
46. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. *Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли*. Москва: Радиотехника, 2005. 368 с.
47. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., and Goldstein R. M. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*. 2000. Vol. 88, No. 3. P. 333–382. DOI: 10.1109/5.838084
48. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. *Радиотелескопы и радиометры*. Москва: Наука, 1973. 416 с.
49. Fischman M. A. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. Vol. 37, No. 5. P. 2172–2180. DOI: 10.1109/36.789614

REFERENCES

- KELLER, J. W., PETRO, N. E., VONDRAK, R. R. and THE LRO TEAM, 2016. The Lunar Reconnaissance Orbiter Mission – Six years of science and exploration at the Moon. *Icarus*. vol. 273, pp. 2–24. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.11.024
- VONDRAK, R. R., KELLER, J. W. and RUSSELL, C. T., eds., 2010. *Lunar Reconnaissance Orbiter Mission*. New York: Springer.
- GOSWAMI, J. N. and ANNADURAI, M., 2009. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon. *Current Science*. vol. 96, no. 4, pp. 486–491.
- YAN SU, GUANG-YOU FANG, JIAN-QING FENG, SHU-GUO XING, YI-CAI JI, BIN ZHOU, YUN-ZE GAO, HAN LI, SHUN DAI, YUAN XIAO and CHUN-LAI LI, 2014. Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. *Res. Astron. Astrophys.* vol. 14, no. 12., pp. 1623–1632. DOI: 10.1088/1674-4527/14/12/010
- GUANG-YOU FANG, BIN ZHOU, YI-CAI JI, QUN-YING ZHANG, SHAO-XIANG SHEN, YU-XI LI, HONG-FEI GUAN, CHUAN-JUN TANG, YUN-ZE GAO, WEI LU, SHENG-BO YE, HAI-DONG HAN, JIN ZHENG and SHU-ZHI WANG, 2014. Lunar Penetrating Radar onboard the Chang'e-3 mission. *Res. Astron. Astrophys.* vol. 14, no. 12, pp. 1607–1622. DOI: 10.1088/1674-4527/14/12/009
- JIN WEIDONG, ZHANG HAO, YUAN YE, YANG YAZHOU, LUCEY PAUL, SHKURATOV YURIY, KAYDASH VADIM, ZHU MENG-HUA, XUE BIN, DI KAI-CHANG, WAN WENHUI, XU BIN, XIAO LONG and WANG ZIWEI, 2015. In-situ optical measurements of Chang'e-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophys. Res. Lett.* vol. 42, is. 20, pp. 8312–8319. DOI: 10.1002/2015GL065789

7. ZHANG HAO, YANG YAZHOU, JIN WEIDONG, YUAN YE, LUCEY PAUL, ZHU MENG-HUA, KAYDASH VADIM, SHKURATOV YURIY, DI KAICHANG, WAN WENHUI, XU BIN, XIAO LONG, WANG ZIWEI, and XUE BIN, 2015. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophys. Res. Lett.* vol. 42, is. 17, pp. 6945–6950. DOI: 10.1002/2015GL065273
8. SHIN-ICHI SOBUE, HAYATO OKUMURA, SUSUMU SASAKI, MANABU KATO, HIRONORI MAEJIMA, HIROYUKI MINAMINO, SATORU NAKAZAWA, HISASHI OTAKE, NAOKI TATENO, HISASHI KONISHI, KATSUhide YONEKURA, HOSHINO HIROKAZU and JUN KIMURA, 2009. The project highlight of Japan's Lunar Explorer Kaguya (SELENE). In: *Proceedings of the 40th Lunar Planet. Sci. Conf.* March 23–27, Houston, Texas, USA, id. 1224.
9. ONO, T. and OYA, H., 2000. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth Planets Space.* vol. 52, no. 9, pp. 629–637. DOI: 10.1186/BF03351671
10. VANIMAN, D., FRENCH, B. and HEIKEN, G., 1991. Chapter 11. Afterword. In: G. H. HEIKEN, D. T. VANIMAN, B. M. FRENCH, eds. *Lunar Sourcebook*. New York: Cambridge University Press, pp. 633–641.
11. SCHMITT, H. H., 2006. *Return to the Moon: Exploration, Enterprise, and Energy in the Human Settlement of Space*. New York: Copernicus books, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/0-387-31064-9
12. WITTENBERG, L., SANTARIUS J. and KULCHINSKI, G., 1986. Lunar source of ^3He for commercial fusion power. *Fusion Technol.* vol. 10, no. 2, pp. 167–178. DOI: 10.13182/FST86-A24972
13. TAYLOR, L. A., 1994. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundances. In: *Engineering Construction & Operations in SPACE IV. Proceedings of Space '94*. New York: ASCE Publ. vol. 1, pp. 678–686.
14. BURNS, J. O., DURIC, N., TAYLOR, G. J. and JOHNSON, S. W., 1990. Observatories on the Moon. *Sci. Amer.* vol. 262, no. 3, pp. 18–25. DOI: 10.1038/scientificamerican0390-42
15. CRAWFORD, I. A. and ZARNECK, I. J., 2008. Astronomy from the Moon. *Astron. Geophys.* vol. 49, is. 2, pp. 2.17–2.19. DOI: 10.1111/j.1468-4004.2008.49217.x
16. JESTER, S. and FALCKE, H., 2009. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.* vol. 53, pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.newar.2009.02.001
17. MIMOUN, D., WEICZOREK, M. A., ALKALAI, L., BANERDT, W. B., BARATOUX, D., BOUGERET, J.-L., BOULEY, S., CECCONI, B., FALCKE, H., FLOHRER, J., GARCIA, R. F., GRIMM, R., GROTT, M., GURVITS, L., JAUMANN, R., JOHNSON, C. L., KNAPMEYER, M., KOBAYASHI, N., KONOVALENKO, A., LAWRENCE, D., LE FEUVRE, M., LOGNONNÉ, P., NEAL, C., OBERST, J., OLSEN, N., RÖTTGERING, H., SPOHN, T., VENNERSTROM, S., WOAN, G. and ZARKA, P., 2012. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.* vol. 33, pp. 529–585. DOI: 10.1007/s10686-011-9252-3
18. CRAWFORD, I. A. and JOY, K. H., 2014. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System. *Phil. Trans. R. Soc. A.* vol. 372, is. 2024, id. 20130315. DOI: 10.1098/rsta.2013.0315
19. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, O. O., BANNIKOVA, O. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. M., BUBNOV, I. M., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYENKO, L. M., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2018. Ukrainian mission to the Moon: Goals and payload. *Kosmichna nauka i tekhnologiya.* vol. 24, no. 1, pp. 3–30 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2018.01.003
20. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYENKO, L. N., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2018. A twofold mission to the Moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica.* (to be published). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
21. THOMPSON, T. W., 1987. High-resolution lunar radar map at 70-cm wavelength. *Earth, Moon, Planets.* vol. 37, is. 1, pp. 59–70. DOI: 10.1007/BF00054324
22. ZISK, S. H., PETTINGILL, G. H. and CATUNA, G. W., 1974. High-resolution radar maps of the lunar surface at 3.8-cm wavelength. *The Moon.* vol. 10, is. 1, pp. 17–50. DOI: 10.1007/BF00562017
23. ART-REACT-QUICKMAP, 2018. *ART-REACT-Quickmap* [online]. [viewed 6 July 2018]. Available from: <http://target.lroc.asu.edu/q3>
24. CAMPBELL, B. A., CARTER, L. M., CAMPBELL, D. B., NOLAN, M., CHANDLER, J., GHENT, R. R., HAWKE, B. R., ANDERSON, R. F. and WELLS, K., 2010. Earth-based 12.6-cm wavelength radar mapping of the Moon: New views of impact melt distribution and mare physical properties. *Icarus.* vol. 208, is. 2, pp. 565–573. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.011
25. NOZETTE, S., LICHTENBERG, C. L., SPUDIS, P., BONNER, R., ORT, W., MALARET, E., ROBINSON, M. and SHOEMAKER, E. M., 1996. The Clementine bistatic radar experiment. *Science.* vol. 274, is. 5292, pp. 1495–1498. DOI: 10.1126/science.274.5292.1495
26. SIMPSON, R. A. and TYLER, G. L., 1999. Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole. *J. Geophys. Res. Planets.* vol. 104, no. E2, pp. 3845–3862. DOI: 10.1029/1998JE900038
27. BEZVESILNIY, O. O., DUKHOPELNYKOVA, I. V., VINOGRADOV, V. V. and VAVRIV, D. M., 2007. Retrieving 3-D topography by using a single-antenna squint-mode airborne SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 45, no. 11, pp. 3574–3582. DOI: 10.1109/TGRS.2007.902963
28. LEBERL, F. W., 1990. *Radargrammetric image processing*. Boston, MA: Artech House.
29. YOCKY, D. A., WAHL, D. E. and JAKOWARZ, C. V. (Jr.), 2004. Terrain elevation mapping results from airborne

- spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 42, no. 2, pp. 301–308. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817683
30. ZEBKER, H. A. and GOLDSTEIN, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometric SAR observations. *J. Geophys. Res.* vol. 91, no. B5, pp. 4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993
 31. BAMLER, R. and HARTL, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* vol. 14, no. 4, pp. R1–R54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001
 32. SHKURATOV, Y., KAYDASH, V., KOROKHIN, V., VELOKODSKY, Y., OPANASENKO, N. and VI-DEEN, G., 2011. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet. Space Sci.* vol. 59, is. 13, pp. 1326–1371. DOI: 10.1016/j.pss.2011.06.011
 33. CHERTOK, B. E., 2011. *Rockets and people. The Moon Race.* Vol. IV. Moscow, Russia: Mashinostroyeniye Publ. (in Russian).
 34. SHKURATOV, Y., LYTVYENENKO, L., SHULGA, V., YATSKIV, Y., VIDMACHENKO, A. and KISLYUK, V., 2003. Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon. *Adv. Space Res.* vol. 31, no. 11, pp. 2341–2345. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00534-9
 35. SHKURATOV, Y. G., KISLYUK, V. S., LYTVYENENKO, L. M. and YATSKIV, Y. S., 2004. Model of the Moon 2004 for the “UkrSelene” project. *Kosmichna nauka i tekhnologiya. Supplement.* vol. 10, no. 2, 51 p. (in Russian) DOI: 10.15407/knit2004.02s.003
 36. BONDARENKO, N. V. and SHKURATOV, Y. G., 1998. A map of regolith-layer thickness for the visible lunar hemisphere from radar and optical data. *Solar Syst. Res.* vol. 32, pp. 264–271.
 37. ALIFANOV, O. M., ANFIMOV, N. A., BELYAYEV, V. S., BODIN, B. V., BOYARCHUK, A. A., ZAKHAROV, A. I., ZATSEPIN, V. I., MILYUKOV, V. K., PANASYUK, M. I., POPOVKIN, V. A., PROKHOROV M. Y., KHARTOV, V. V., CHEREPASCHUK, A. M., SHEVCHENKO, V. V. and SHUSTOV, B. M., 2014. *Fundamental space research. Book 2: Solar System.* Moscow, Russia: Fizmatlit Publ. (in Russian).
 38. MCKAY, D., HEIKEN, G., BASU, A., BLANFORD, G., SIMON, S., REEDY, R., FRENCH, B. and PAPIKE, J., 1991. Chapter 7. The Lunar Regolith. In: G. H. HEIKEN, D. T. VANIMAN, and B. M. FRENCH, eds. *Lunar source book: A user's guide to the Moon.* New York: Cambridge University Press, pp. 285–356.
 39. BASS, F. G. and FUKS, I. M., 1979. *Wave scattering from statistically rough surfaces.* New York: Pergamon Press.
 40. HENYEY, L. C. and GREENSTEIN, J. L., 1941. Diffuse radiation in the Galaxy. *Astrophys. J.* vol. 93, pp. 70–83.
 41. STANKEVICH, D. and SHKURATOV, Y., 2004. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* vol. 87, is. 3-4, pp. 289–296. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.014
 42. SHKURATOV, Y. G., STANKEVICH, D. G., PETROV, D. V., PINET, P. C., CORD, A. M., DAYDOU, Y. H. and CHEVREL, S. D., 2005. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: shadowing and multiple scatter. *Icarus.* vol. 173, is. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1016/j.icarus.2003.12.017
 43. SCOLNIK, M. I., 1989. *Radar Handbook.* New York: McGraw-Hill Book Company.
 44. RUSSIAN FEDERATION STATE STANDARD., 1995. Surfaces of the Moon, Mars, and Venus. Radiophysical Parameters. In: *Russian Federation State Standard P 25645.161–94.* Moscow: Standard Publ. (in Russian).
 45. KINGSLEY, S. and QUEGAN, S., 1999. *Understanding Radar Systems.* New Jersey: SciTech Publishing, Inc.
 46. KONDRATENKOV, G. S. and FROLOV, A. Y., 2005. *Radiovision. Radar system of remote sensing of the Earth.* Moscow, Russia: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
 47. ROSEN, P. A., HENSLEY, S., JOUGHIN, I. R., LI, F. K., MADSEN, S. N., RODRIGUEZ, E. and GOLDSTEIN, R. M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE.* vol. 88, no. 3, pp. 333–382. DOI: 10.1109/5.838084
 48. YESEPKINA, N. A., KOROLKOV, D. V. and PARIYSKI, Y. N., 1973. *Radio telescopes and radiometers.* Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
 49. FISCHMAN, M. A., 1999. Sensitivity of a 1.4 GHz Direct-Sampling Digital Radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 37, no. 5, pp. 2172–2180. DOI: 10.1109/36.789614
- V. G. Galushko¹, V. V. Vinogradov¹, and Y. G. Shkuratov^{1,2}*
- ¹Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- ²Research Institute of Astronomy of V. N. Karazin
Kharkiv National University,
35, Sumska St., Kharkiv, 61022, Ukraine
- MILLIMETER WAVE SATELLITE RADAR
FOR INVESTIGATION OF THE MOON'S SURFACE:
A PROPOSAL
- Purpose:* Development and justification of the concept of construction of a millimeter wave satellite radar for investigation of the Moon's surface and estimation of the radar performance characteristics for operation in the modes of active location, including aperture synthesis, and passive radiometric sounding. *Design/methodology/approach:* To map the Moon's surface with a high spatial resolution and search of anomalies in the thermal radiation field, it is suggested to use a satellite millimeter wave radar capable of operating in the side-looking/squint-looking synthetic aperture mode. *Findings:* Three operation modes of a millimeter wave satellite radar are suggested and justified for investigating the Moon's surface. The considered modes include active monostatic sounding of the Moon's surface with a rather crude spatial resolution (approximately 1400×1000 m), construction of radio images and restoration of the relief of the Moon's surface (or its individual areas) with a high resolution (resolution cell size $\leq 22 \times 25$ m) using algorithms of side-looking/squint-looking aperture synthesis, and passive (radiometric) sounding of the temperature field with resolution about 1400×2000 m. Estimates of the basic parameters and power of the radar required to provide sufficiently high signal-to-power ratios in each of these modes are obtained.

Conclusions: Experiments using the suggested radar would allow estimating the electrophysical and structural parameters of the upper layer of the regolith several centimeters in thickness, determining the reflective properties of the Moon's surface and recovering a 3D image of its relief with a high resolution (a few dozens of meters), and also investigating the spatial distribution and anomalies of the thermal radiation with the aim of searching irregularities in the structure of the Moon's crust.

Key words: satellite radar, synthetic aperture, radiometric mode, Moon's surface, regolith

В. Г. Галушко¹, В. В. Виноградов¹, Ю. Г. Шкуратов^{1,2}

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Науково-дослідний інститут астрономії Харківського
національного університету імені В. Н. Каразіна,
вул. Сумська, 35, м. Харків, 61022, Україна

ПРОЕКТ СУПУТНИКОВОГО РАДАРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ

Предмет і мета роботи: Розробка та обґрунтування концепції побудови супутникового радара міліметрового діапазону для дослідження поверхні Місяця та оцінка його параметрів для роботи в режимах активної локації, включаючи синтезування апертури, та пасивного радіометричного зондування.

Методи і методологія: Для картографування поверхні Місяця з високим просторовим розділенням і пошуку ано-

малій поля теплового випромінювання пропонується використовувати супутниковий радар міліметрового діапазону з можливістю синтезування апертури бічного/передньобічного огляду.

Результати: Запропоновано та обґрунтовано три режими роботи супутникового локатора міліметрового діапазону для дослідження поверхні Місяця. Розглянуті режими включають активне моностатичне зондування поверхні Місяця з досить грубою просторовою роздільністю (приблизно 1400×1000 м), побудову радіозображення та відтворення рельєфу місячної поверхні (або окремих її ділянок) з високою роздільністю (розмір елемента розділення $\leq 22 \times 25$ м) з застосуванням алгоритмів бічного/передньобічного огляду та пасивне (радіометричне) зондування поля температур з розділенням приблизно 1400×2000 м. Отримано оцінки основних параметрів і потужності радара, необхідними для забезпечення достатньо високого співвідношення сигнал/завада в кожному з цих режимів.

Висновки: Експерименти за допомогою запропонованого локатора дозволять оцінювати електрофізичні та структурні параметри верхнього шару реголіту товщиною в декілька сантиметрів, визначати відбиваючі властивості місячної поверхні та відтворювати тривимірне зображення її рельєфу з високою роздільністю (кілька десятків метрів), а також досліджувати просторовий розподіл і аномалії поля теплового випромінювання з метою пошуку неоднорідностей в будові місячної кори.

Ключові слова: супутниковий локатор, синтезована апертура, радіометричний режим, поверхня Місяця, реголіт

Стаття постуила в редакцію 09.07.2018