

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.11>

УДК: 523.34-83

ОСОБЕННОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА В ПРОЕКТЕ ЛУНА-РЕСУРС-1

В.Н. Марчук, О.В. Юшкова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2023 г.

Аннотация. Радарный комплекс РЛК-Л состоит из Радара 20 (частотный диапазон 17.5 – 22.5 МГц) и Радара 200 (частотный диапазон 140 – 180 МГц), предназначен для исследования приповерхностного слоя Луны в рамках проекта ЛУНА-РЕСУРС-1. Для уменьшения объема передаваемых на Землю данных при приеме будет применено аналоговое гетеродинирование, что дополнительно позволит использование более дешевого и надежного устройства, преобразующего входной аналоговый сигнал в дискретный код. Рассмотрены особенности приема и оцифровки отраженных от грунта радиосигналов РЛК-Л.

Ключевые слова: луна, космический аппарат, радар, радиосигнал, линейная частотная модуляция, гетеродинирование.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00.

Автор для переписки: Марчук Василий Николаевич, marchuk_vn@mail.ru

Введение

В рамках проекта «Луна-Ресурс-1» планируется доставка орбитального аппарата «Луна-26» (ОА) на окололунную полярную орбиту для проведения дистанционных исследований Луны. Одна из целей научной программы проекта

– исследование поверхности и подповерхностного слоя грунта естественного спутника Земли, их картографирование [1]. Для достижения этой цели на орбитальный аппарат будет установлен радарный комплекс РЛК-Л, в состав которого войдет два радара:

- Радар 20 (частотный диапазон 17.5 – 22.5 МГц) для исследования слоя грунта толщиной в несколько сотен метров;
- Радар 200 (частотный диапазон 140 – 180 МГц) для исследования поверхности и слоя грунта толщиной в несколько десятков метров [2].

Каждый прибор будет излучать сигнал постоянной амплитуды с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), а затем принимать отраженный от грунта – на ту же антенную систему. Длительность излученного сигнала τ – 250 мкс, время приема отраженного – 350 мкс. Для уменьшения объема передаваемых на Землю данных будет применено аналоговое гетеродинирование – аппаратное понижение частоты отраженного от приповерхностного слоя сигнала перед проведением его регистрации. Цель операции – оцифровать сигнал без потерь качества научной информации, используя более дешевую и надежную установку для преобразования входного аналогового сигнала в дискретный код (АЦП) с тактовой частотой порядка 10 МГц. Особенности этой операции рассматриваются в данной статье.

1. Диэлектрические свойства лунных пород

Грунт Луны имеет выраженную слоистую структуру: рыхлый слой осадочных пород (реголит) лежит на более твердой основе, состоящей из коренных пород. Возвратными миссиями «Apollo» (США), «Луна» (СССР) и «Чаньэ-5» (Китай) на Землю были доставлены образцы типов пород из десяти посадочных мест центральной части видимой стороны Луны. Физические, в том числе и диэлектрические, параметры более ста образцов различных пород были исследованы в лабораторных условиях на Земле. Результаты анализа проведенных измерений показали, что действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' реголита имеет значения от 1.8 до 4, коренных пород – от 4 до

8 – 9 [3-4]. Для частот радиоволн из рабочего диапазона радаров тангенс угла потерь пород оказался ограничен значениями от 10^{-3} до 10^{-2} , что позволяет надеяться на то, что на Луне, как и на Марсе, радиолокационным исследованиям доступен слой грунта толщиной в несколько километров [5]. Для моделирования работы радара будем считать, что лунный грунт состоит из трех слоев: реголита, далее лежит переходный слой (для решения задачи данной работы достаточно считать его диэлектрически однородным). Оба слоя расположены на фундаменте из коренных пород. Для описания модели грунта необходимо задать толщину реголита d_r и переходного слоя d_p , но так как они связаны с $t_{r,p}$ – временем распространения радиоволны от поверхности каждого слоя состоящего из породы с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon'_{r,p}$ до его нижней границы и обратно формулой $d_{r,p} = \frac{t_{r,p}c}{2\sqrt{\varepsilon'_{r,p}}}$, мы зададим значения t_r и t_p . В формуле c – скорость света в вакууме.

2. Исходные сигналы РЛК-Л

ЛЧМ сигнал во временном интервале излучения от 0 до τ запишем в виде [6]:

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi(f_{min} + \Delta F \cdot t/\tau) \cdot t) \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда, τ – длительность излученного сигнала, ΔF – ширина рабочей полосы ЛЧМ сигнала, для Радара 20 $\Delta F_1 = 5$ МГц, для Радара 200 $\Delta F_2 = 40$ МГц. Минимальная частота рабочего диапазона Радара 20 f_{min1} равна 17.5 МГц, а Радара 200 f_{min2} соответствует 140 МГц. Спектр ЛЧМ сигнала обоих радаров имеет практически прямоугольный спектр [7]. Вид спектра Радара 20 показан на рис. 1(а). По горизонтальной оси приведены частоты в мегагерцах, по вертикальной – значение амплитудного спектра.

3. Математическое описание отраженных от поверхности Луны сигналов РЛК-Л

Согласно [8], отраженный от моделируемого трехслойного грунта радиосигнал может быть представлен в виде суперпозиции радиосигналов, отраженных от поверхности и внутренних границ, сдвинутых на время, необходимое на распространение до этих границ и обратно, если не учитывать вторичные отражения (это возможно, так как амплитуда вторично переотраженных сигналов в лунном грунте мала, в силу его диэлектрических лунных пород). Такие сигналы называются – парциальные. Амплитуда этих сигналов уменьшается на коэффициент Френеля, но так как нас интересует механизм формирования и способ приема, а не потери при отражении сигналов от границ и не поглощение сигнала во время распространения его в грунте, при моделировании мы рассмотрим суперпозицию парциальных сигналов с единичной амплитудой. Набег фазы при распространении сигнала от ОА до отражающей границы и обратно равен $\varphi = k \cdot 2r$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, r – расстояние до отражающего объекта, λ – длина радиоволны.

Каждый радар комплекса РЛК-Л, снабжен высотомером, то есть время прихода отраженного сигнала приблизительно известно, но приемник включается заранее, что позволяет устранить потери полезного сигнала, вызванные как ошибкой измерения дальности от ОА до поверхности Луны, так и возможным изменением рельефа местности в процессе зондирования. При моделировании примем, что приемник включен за 10 мкс до прихода сигнала, отраженного от поверхности Луны. Через t_r на приемник поступает сигнал, отраженный от границы раздела между реголитом и переходным слоем. Сдвиг сигнала, отраженного от границы между переходным слоем и коренными породами по отношению к сигналу, отраженному от поверхности равен сумме времен $t_r + t_p$. При моделировании для t_r приняты следующие значения 0.05 мкс для Радара 200 и 0.5 для Радара 20 (время выбрано так, чтобы обеспечить сепарацию сигналов от границ наиболее тонкого слоя); величина $t_r + t_p$ соответствует 25 мкс для обоих радаров. В зависимости от района проведения измерений значения t_r и t_p могут значительно варьироваться, но для

определенности при моделировании выбраны три фиксированных значения из допустимого диапазона. Этим трем значениям, по мнению авторов, достаточно, чтобы смоделировать следующие ситуации:

1. отражение от слоя реголита, когда сигналы, отраженные от его верхней и нижней границы, находятся на пределе разрешающей способности радара;
2. отражение от верхней границы коренных пород для оценки точности определения глубины границы слоя грунта, доступного для радиолокационного изучения [10]. Все остальные случаи будут комбинацией этих двух.

4. Гетеродинирование и обработка сигнала Радара 20

Аппаратное гетеродинирование при приеме понижает частотный диапазон принимаемого сигнала. При математическом моделировании эта процедура аналогична умножению ЛЧМ сигнала Радара 20 на функцию $\cos(2\pi f_g \cdot t)$, где f_g – частота гетеродина. Учитывая тригонометрические формулы, получим выражение:

$$s_{gfc1}(t) = \frac{A_0}{2} [\cos(2\pi(f_{min1} - f_g + \Delta F_1 \cdot t/\tau) \cdot t + \varphi) + \cos(2\pi(f_{min1} + f_g + \Delta F_1 \cdot t/\tau) \cdot t + \varphi)] = s_{gc1}(t) + s_{fc1}(t) \quad (2)$$

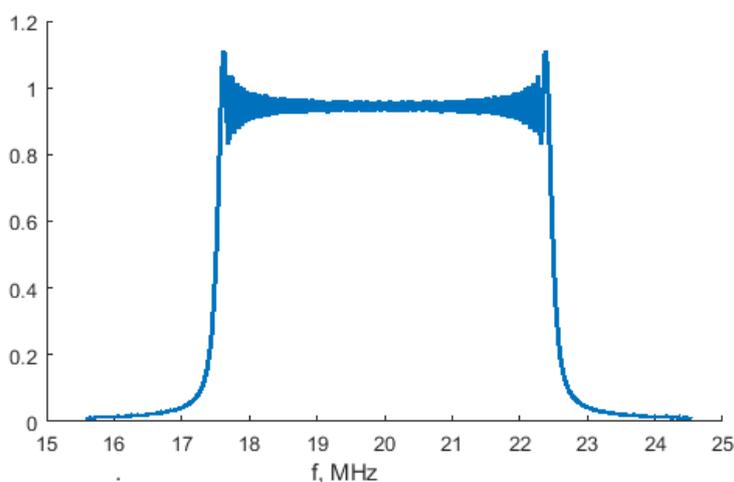
Первое слагаемое $s_{gc1}(t)$ в функции $s_{gfc1}(t)$ в формуле (2) описывает низкочастотный сигнал, который подлежит оцифровке, второе слагаемое $s_{fc1}(t)$ – высокочастотный сигнал, который в дальнейшем не учитывается (фильтруется). Спектр сигнала $s_{gc1}(t)$ при $f_g = f_{min}$ приведен на рис. 1 (б). Фаза сигнала $s_{gc1}(t)$ сохраняется без изменений, а амплитуда уменьшается в два раза. Восстановить фазу сигнала из выражения $s_{gc1}(t)$ можно с точностью до 2π в интервале от 0 до π , используя функцию арккосинус. Во избежание потерь полезной информации в радарах будет использоваться квадратурный прием: если первая квадратурная компонента соответствует $s_{gc1}(t)$, то вторая – получается умножением сигнала (1) на функцию $\sin(2\pi f_g t)$ с последующей фильтрацией высокочастотной части:

$$s_{gfs1}(t) = \frac{A_0}{2} [\sin(2\pi(f_g - f_{min1} - \Delta F_1 \cdot t/\tau) \cdot t - \varphi) + \sin(2\pi(f_{min1} + f_g + \Delta F_1 \cdot t/\tau) \cdot t + \varphi)] = s_{gs1}(t) + s_{fs1}(t) \quad (3)$$

Функция арксинус позволяет определить фазу сигнала в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$. Совместное использование низкочастотных частей двух квадратур функций (2) и (3) дает возможность полного описания изменения фазы отраженного сигнала за время приема. На рис. 1 приведены спектры Радара 20 до (а) и после гетеродинирования (б).

Оцифровке подлежат обе квадратурные составляющие. Дискретный образ каждой составляющей записывается в отдельный цифровой массив данных, который дополняется маркером радара, номером и временем проведения измерения. Серия массивов данных, полученных в результате одного эксперимента, сопровождается информацией о бортовом времени включения РЛК-Л, количестве измерений, режимах работы передатчика и приёмного тракта и пересылается на Землю.

На Земле полученные данные будут проходить несколько стадий обработки: начальная – экспресс-анализ, затем дискретные массивы будут переданы научным коллективам для решения обратных задач подповерхностного зондирования. В рамках экспресс анализа работы прибора данные измерений анализируются с целью обнаружения подповерхностных неоднородностей, наличие которых обуславливает образование отраженных парциальных сигналов.



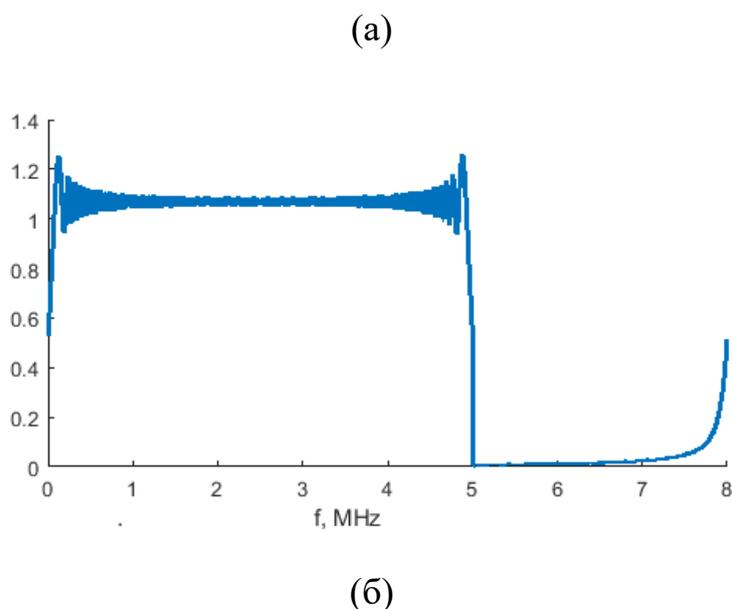


Рис. 1. Спектр сигнала (а) исходный (б) после понижения частоты.

Чтобы определить время отражения парциальных сигналов от поверхности и внутренних границ производится «сжатие» сигналов, для этого используются методы корреляционной обработки сигналов (например, согласованная фильтрация), т. е. проводят свёртку принятого сигнала с цифровой моделью комплексно-сопряженного исходного сигнала, в результате «длительность» сигнала уменьшается обратно пропорционально ширине полосы частот. Пример результата фрагмента свертки для моделируемого грунта представлен на рис. 2. На рисунке по горизонтали отмечена ось времени в мкс, по вертикали амплитуда свертки в условных единицах. Данные временной оси могут быть пересчитаны в метки по глубине $\int_0^{h_i} \sqrt{\varepsilon(z)} dz = 0.5t_i c$ по формуле $\int_0^{h_i} \sqrt{\varepsilon(z)} dz = 0.5t_i c$, но, так как диэлектрическая проницаемость грунта априори неизвестна, результаты моделирования традиционно приводятся для временной оси. На рисунке выделены три сигнала: отраженный от поверхности, от границы между реголитом и переходным слоем, от поверхности коренных пород.

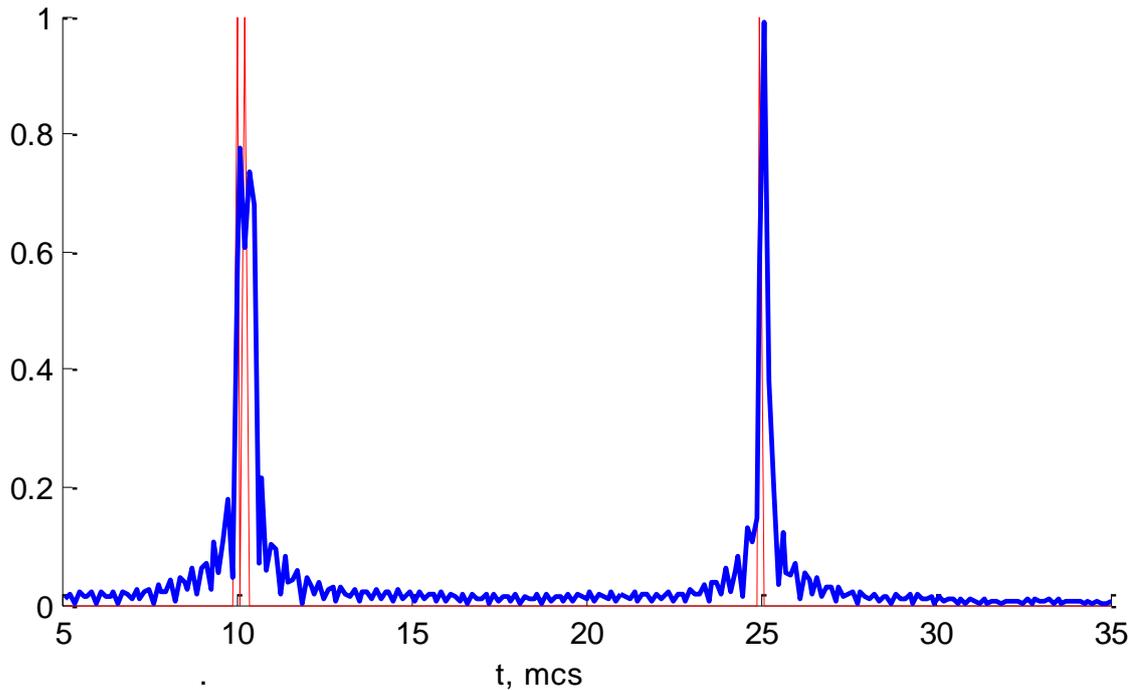


Рис.2. Результат корреляционной обработки модели отраженного сигнала (фрагмент).

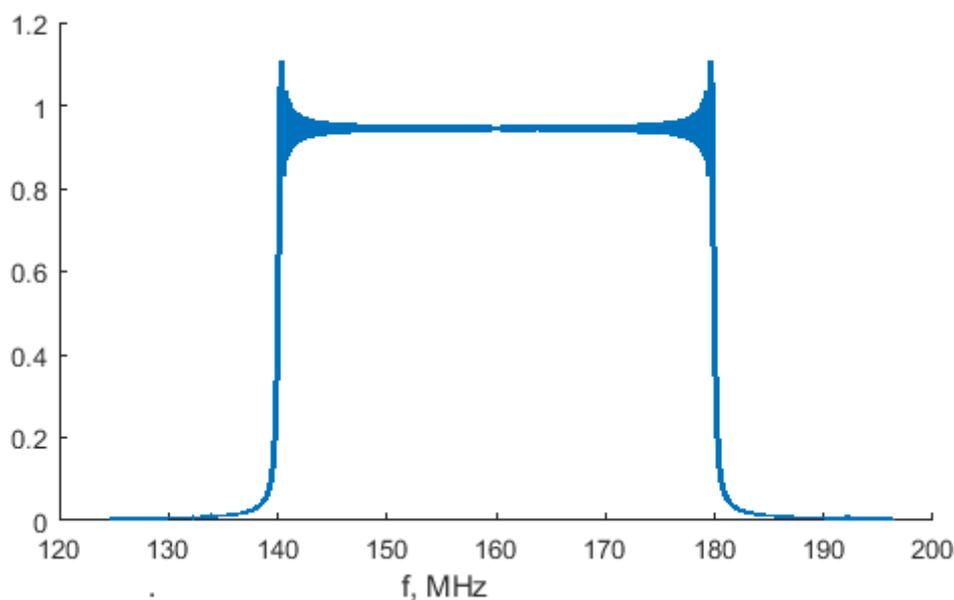
5. Гетеродинирование и обработка сигнала Радара 200

Сигналы, поступающие на приемник Радара 200 обрабатываются по похожей, но отличающейся от предыдущей технологии: понижение частоты производится не на постоянное значение частоты, а на меняющуюся во времени линейную функцию $f_g(t) = f_{min2} + \Delta F_2 \cdot (t - t_z)/\tau$, где t_z – время, равное разности времени включения приемника радара (и, соответственно, гетеродина) и времени прихода переднего фронта отраженного сигнала. Математически процесс гетеродинирования сигнала моделируется как произведение принимаемого отраженного сигнала на функцию $\cos(2\pi(f_{min} + \Delta F \cdot (t - t_z)/\tau) \cdot t)$ для выделения первой квадратурной компоненты и на $\sin(2\pi(f_{min} + \Delta F \cdot (t - t_z)/\tau) \cdot t)$ для второй. В результате перемножения и последующей фильтрации низкочастотных составляющих, получим выражения для дискретизации:

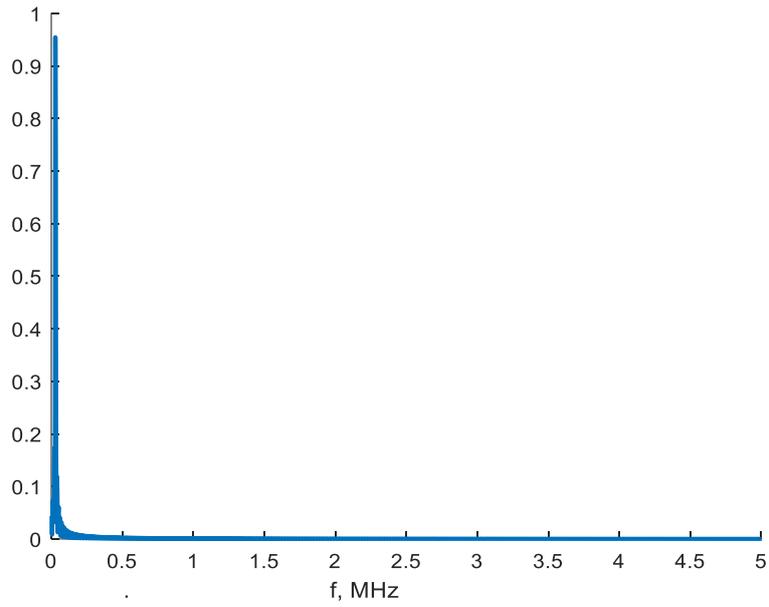
$$s_{gfc2}(t) = \frac{A_0}{2} \cos((2\pi t \Delta F_2 t_z/\tau) + \varphi) \text{ и } s_{gfs2}(t) = \frac{A_0}{2} \cos((-2\pi t \Delta F_2 t_z/\tau) - \varphi).$$

На рис. 3 (а) приведен спектр исходного сигнала Радара 200, на рис. 3 (б) сигнала после фильтрации.

В принятом приемником радара нескольких отраженных парциальных сигналов после гетеродинирования в спектре сигнала будет наблюдаться суперпозиция нескольких пиков, по которым можно пересчитать запаздывание сигналов (Рис. 4) [9]. На рис. 4 (а) дан результат спектральной обработки моделируемого отраженного сигнала прибора Радар 200 с пересчетом шкалы абсцисс из частот спектра в микросекунды согласно соотношению $t = f\tau/\Delta F_2$. На рисунке хорошо видно отражение от поверхности и границы между переходным слоем и коренными породами. На рис. 4 (б) приведен фрагмент этого же рисунка, в большем масштабе показано, что первый сигнал представляет собой композицию двух сигналов, отраженных от верхней и нижней границы реголита.

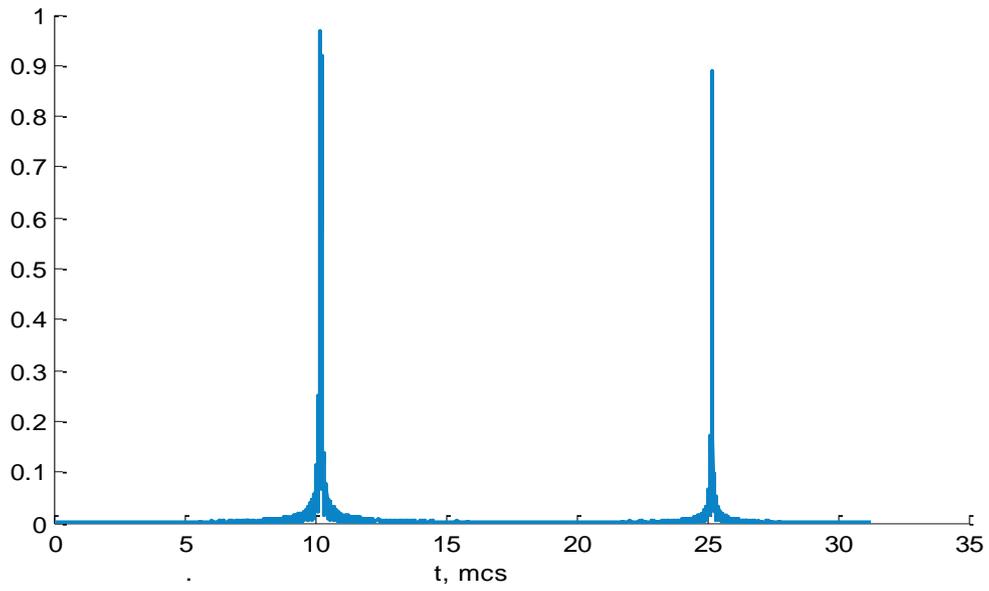


(a)

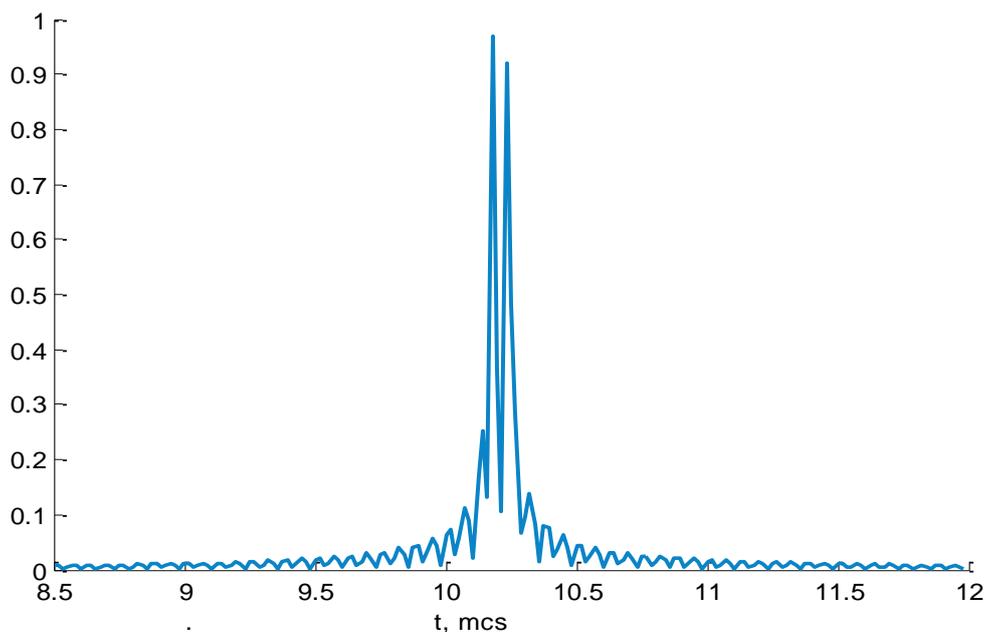


(б)

Рис. 3. Спектр излучаемого сигнала прибора Радар 200 до гетеродинирования (а) и после (б).



(а)



(б)

Рис.4. Результат спектральной обработки модели отраженного сигнала прибора Радар 200 с пересчетом шкалы абсцисс в мкс: (а) полная шкала, (б) фрагмент в области 10 мкс.

На основе описанного механизма приема отраженных от грунта Луны сигналов радаров РЛК-Л проведена серия численных экспериментов, в результате сделаны следующие выводы:

1. Результатом гетеродинирования принятого сигнала обоих радаров РЛК-Л является смещение полосы частот в диапазон от 0 МГц до 5 МГц для последующей дискретизации.
2. При наличии двух квадратурных каналов для оцифровки гетеродинированного сигнала с полосой 5 МГц достаточно использовать АЦП с частотой дискретизации 8 МГц. Если использовать только один квадратурный канал нужен АЦП с тактовой частотой больше 12 МГц.
3. При моделировании получена расчетная ширина «сжатого» сигнала равная 375 нс для Радара 20 и ширина спектральной составляющей 54 нс для Радара 200, что дает оценку точности определения глубины отражающего слоя не хуже 28 м и 4 м, соответственно (без учета диэлектрической проницаемости).

4. Во избежание искажений спектра принимаемого сигнала оба квадратурных канала должны иметь одинаковые характеристики, что достигается путём калибровки прибора в процессе предполетной подготовки.

5. Ошибка определения высоты ОА приводит к преждевременному или запоздалому включению системы приема и регистрации сигнала. В случае запоздалого включения сигнал принимается не с начала (обрезается). В этом случае энергия и частотная полоса сигнала уменьшаются пропорционально потерявшему временному интервалу, что приводит к потере научной информации и ухудшению разрешающей способности радара. Однако при потерях времени прихода не более 10 мкс, отраженные сигналы удается восстановить без существенной потери качества. При больших значениях ошибки, особенно у Радара 200, возникает наложение сигналов, отраженных от поверхности и внутренних границ, находящихся на больших глубинах, что тоже приводит к потере научной информации.

Результаты моделирования будут учтены при разработке, создании, предполетной подготовке радаров и составлении программы проведения подповерхностного зондирования грунта Луны радарным комплексом РЛК-Л в проекте ЛУНА-РЕСУРС-1.

Заключение

В работе обсуждается механизм расчета радиояркой температуры неоднородного грунта Луны. Приведена рекуррентная формула удобная для численного моделирования экспериментов, связанных с исследованием собственного излучения Луны, теплового режима на ее поверхности и внутри верхнего слоя грунта с помощью радиометра. Показана связь выведенной формулы расчета этой величины с формулами, приведенными в статьях, посвященных моделированию яркой температуры в проектах Chang-E и ESMO (European Student Moon Orbiter).

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00.

Литература

1. Смирнов В. М. , Юшкова О. В., Марчук В. Н. и др. Проект Луна-Глоб: радиолокационное зондирование грунта Луны // Радиотехника и электроника. 1913. Т. 58. №9. С. 926-926. <https://doi.org/10.7868/S0033849413090131>
2. Юшкова О.В., Гаврик А.Л., Марчук В.Н. и др. Бистатическая радиолокация в проекте ЛУНА-РЕСУРС // Астрономический вестник. 2018. Т. 52. № 4. С. 291-304. <https://doi.org/10.1134/S0038094618040081>
3. Heiken G., Vaniman D., French B. M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon // Cambridge University Press. 1991. 736 p. https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/LunarSourceBook.pdf
4. Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon // Earth and Planetary Science Letters. 1975. vol. 24. pp. 394 – 404 [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90146-6)
5. Seu R., Biccari D., Orosei R. et al. SHARAD: The MRO 2005 shallow radar. // Planet Space Sci. 2004. №52. pp. 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2003.08.024>
6. Сколник М. Справочник по радиолокации. Том 1 М.: Сов. Радио, 1976. 456с.
7. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848с.
8. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
9. Чернышев Б. В., И. Н. Дутьшев, В. М. Смирнов. Увеличение разрешающей способности радиолокационного комплекса РЛК-Л для космического аппарата «Луна-Ресурс-1». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/6/text.pdf>
10. Марчук В. Н., Юшкова О. В. Оценка предельной глубины зондирования грунта Луны радаром космического базирования // Сборник докладов Всероссийские открытые Армандовские чтения «Муром 2023», Муром:

Муромский институт, 26–30 июня 2023 г. с. 217-222.

https://www.mivlgu.ru/conf/armand2023/sbornik/pdf/S2_14.pdf

Для цитирования:

Марчук В.Н., Юшкова О.В. Особенности приема сигналов радиолокационного комплекса РЛК-Л в проекте ЛУНА-РЕСУРС-1. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.11>