

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.8>

УДК 520.6.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЁМНО- ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЗОНДИРОВАНИЯ ЛУННОГО ГРУНТА

Д. А. Семенов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук, 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 3 июня 2021 г.

Аннотация. В статье приведено описание приёмно-передающего модуля на основе АФАР для радиолокационного комплекса, предназначенного для зондирования лунного грунта. Приводятся программа и результаты испытаний разработанного приёмно-передающего модуля.

Ключевые слова: диапазон частот, излучатель, импульсная мощность, коэффициент передачи, коэффициент стоячей волны, масса, диапазон регулировки фазы, фаза, шаг регулировки.

Abstract. The article presents the description of the receiving-transmitting module based on AESA for radar system intended for sounding the lunar soil. The program and test results of the developed receiving-transmitting module are presented.

Keywords: frequency range, emitter, pulse power, transmission ratio, standing wave ratio, mass, phase adjustment range, phase, step adjustment.

Введение

Метод радиолокации позволяет проводить исследование грунта, различных сред. Радиолокационный метод исследования грунта достаточно апробирован в условиях Земли, что позволяет применять его и при исследовании лунного грунта. В условиях Луны в связи с отсутствием атмосферы возможно использование коротковолнового диапазона с меньшим ослаблением радиолокационного сигнала.

Важными характеристиками радиолокационного комплекса для сканирования лунного грунта являются повышенная скорость сканирования и высокий уровень разрешения. Активная фазированная антенная решётка характеризуется узким лучом диаграммы направленности, возможностью оперативного изменения алгоритма сканирования. Эти характеристики обеспечивают её преимущество перед другими антенными системами в целях зондирования лунного грунта с радиолокационного комплекса в активном режиме. Активная фазированная антенная решётка позволяет быстро «качать» сканирующий луч, что повышает точность результатов сканирования. Активную фазированную антенную решётку, излучающую на частоте приблизительно 20 МГц можно использовать для зондирования лунного грунта на глубину до 100 км, а активную фазированную антенную решётку, излучающую на частоте более 1000 МГц можно использовать для зондирования лунного грунта на глубину до 10 метров, но с высоким разрешением, что позволяет использовать 3D-георадар для получения наглядных визуальных результатов неглубоких подповерхностных слоёв лунного грунта.

Актуальность исследования:

- задача поиска принципиально новых источников энергии с использованием, в том числе и ресурсов других планет.
- исследование состава органических соединений, которые формировались в течение миллиардов лет на дне полярных кратеров
- один из возможных путей решения энергетической проблемы связан с использованием гелия-3 в термоядерном синтезе, с его добычей и доставкой с Луны.
- среди множества научных направлений исследования Луны, приоритетным является исследование состава, структуры лунного грунта, который содержит много дефицитных на Земле редкоземельных соединений, а проблема их дефицита на земной поверхности важна в аспекте «высоких» технологий, требующих использования редкоземельных металлов.

- по предположениям астрономов в лунном грунте приполярных областей Луны содержатся химические соединения из других звездных систем, включая и редкоземельные металлы, которые появляются в лунном грунте в результате падения астероидов, солнечного ветра, который на протяжении миллиарда лет облучал Луну.

1. Общие характеристики приёмно-передающего модуля на основе активной фазированной антенной решётки

В радиолокационном комплексе для зондирования лунного грунта в активном режиме используется активная фазированная антенная решётка.[1] Это позволяет снизить массогабаритные характеристики радиолокационного комплекса, что важно при установке оборудования на перелётном космическом модуле.

Макет приёмно-передающего модуля (далее ППМ) представляет 8-элементную подрешетку активной фазированной антенной решётки. Он обеспечивает передачу и приём сигналов с независимым усилением, управлением амплитудой и фазой СВЧ сигнала в каждом из 8 каналов. Структурная схема устройства приёмно-передающего модуля представлена на рис. 1.

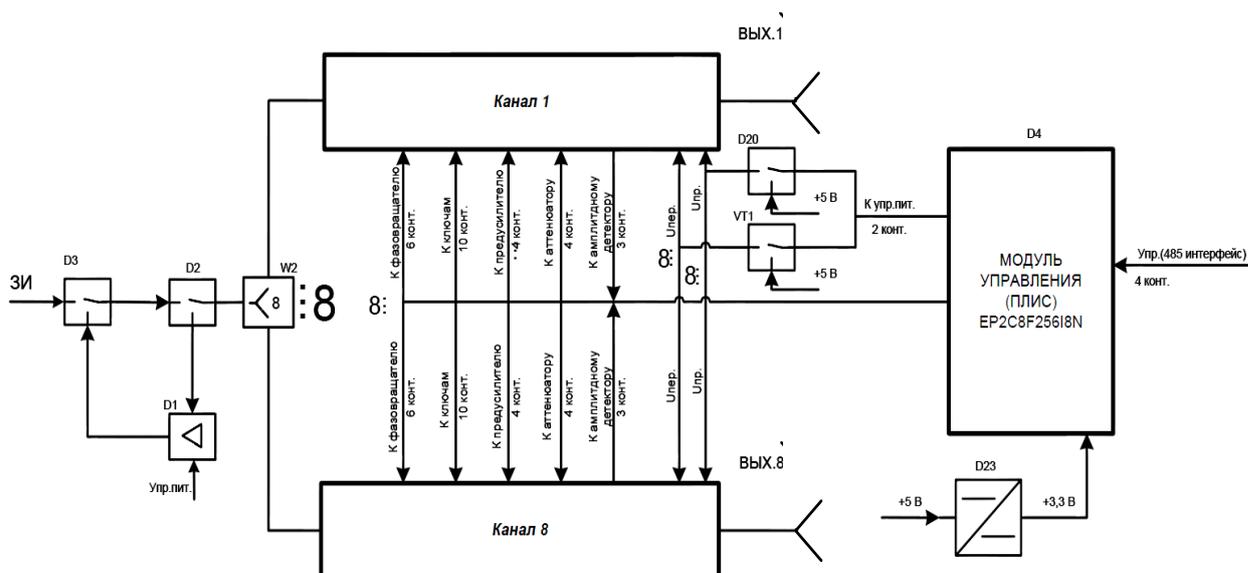


Рис. 1. Структурная схема устройства приёмно-передающего модуля.

На рис. 2. представлена структурная схема одного канала ППМ. Макет ППМ включает 8 приёмо-передающих каналов. Передающая часть включает твердотельный усилитель мощности. Усиление управляется дискретно. Сигнал, поступающий на ППМ с передатчика делится с помощью делителя мощности на 8, после чего поступает на входы передающих частей каналов ППМ. Сигнал в каждом канале регулируется по фазе, амплитуде, для чего используются фазовращатель, управляемый усилитель. Приёмная часть канала включает ограничитель, фильтры, малошумящий усилитель (МШУ) и аттенюатор. Принимаемый сигнал фильтруется, усиливается, регулируется по амплитуде и фазе с помощью дискретных аттенюатора и фазовращателя, суммированию с выходов всех каналов. Передающая и приёмная часть канала объединяются по входам и выходам посредством коммутаторов. Фаза сигнала в режимах передачи и приёма регулируется одним фазовращателем.

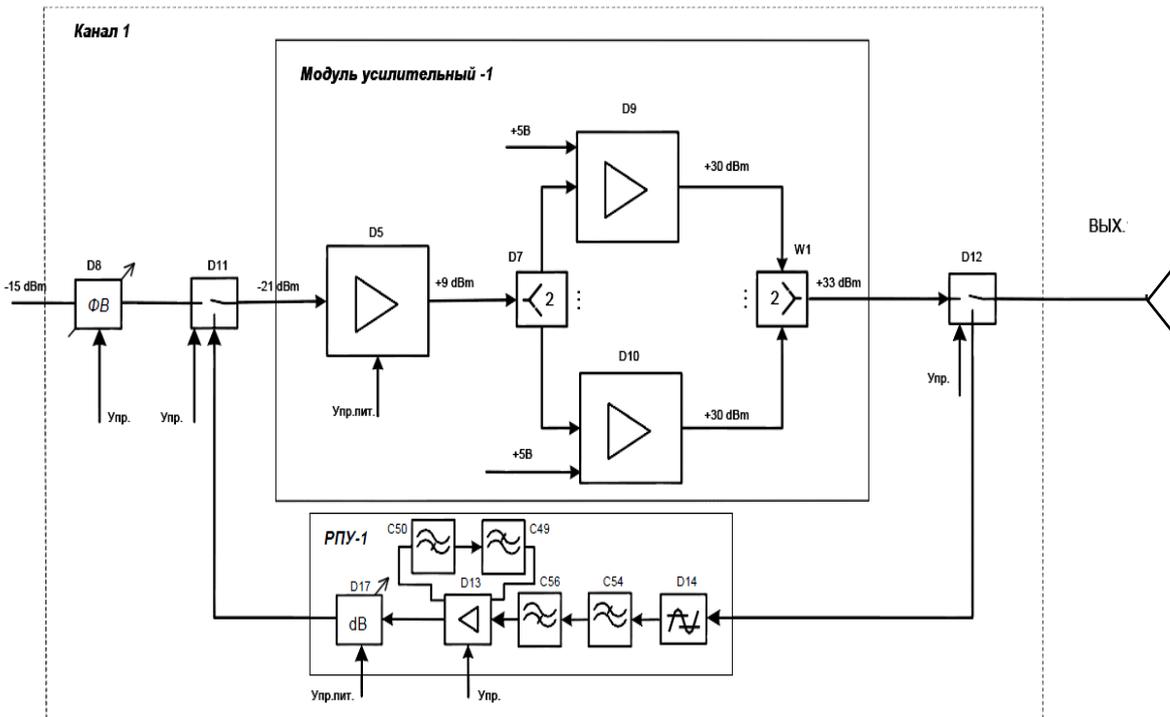


Рис. 2. Структурная схема одного канала ППМ.

Несущий элемент конструкции ППМ - экранирующая панель, (Рис. 3) изготавливаемая из стеклотекстолита FR4 толщиной 0,4 мм. Производство

такой платы можно осуществлять печатным способом, что снижает стоимость приёмно-передающего модуля.[2]

Экранирующая панель представлена на рис. 3.

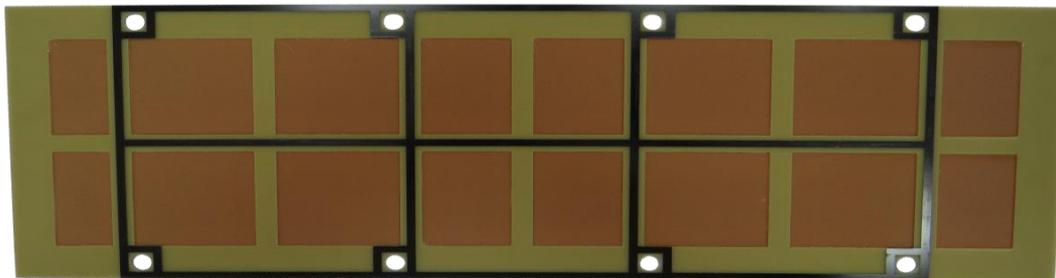


Рис. 3. Внешний вид экранирующей панели.

На неё с одной стороны установлены излучатели (Рис. 4), а с другой – устройство приёмно-передающее. (Рис. 5)

Внешний вид излучателей 4-канальных приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид излучателей макета ППМ.

Излучатель 4-канальный представляет собой линейку полуволновых вибраторов с линейной поляризацией. Излучатели в составе АФАР обеспечивают ширину сектора углов электронного сканирования относительно нормали к раскрыву АФАР $\pm 45^\circ$ и $\pm 22^\circ$ соответственно в азимутальной и угломестной плоскостях. Конструкция излучателей обеспечивает минимальную массу ППМ.

Излучатели изготавливаются по 4 на одной стеклотекстолитовой печатной плате толщиной 0,8 мм. С целью повышения жесткости подрешётки по периметру плат излучателей и экранирующей панели установлены рамки из FR4 толщиной 0,7 мм, а платы излучателей скрепляются между собой

капролоновыми профилями. Для понижения массы в платах излучателей делаются окна. Размеры макета ППМ с излучателями: 490x175x90 мм.

Внешний вид печатной платы 8 приёмо-передающих каналов макета ППМ представлен на рис. 5. Размер: 490x175 мм. Масса составила 60 г.

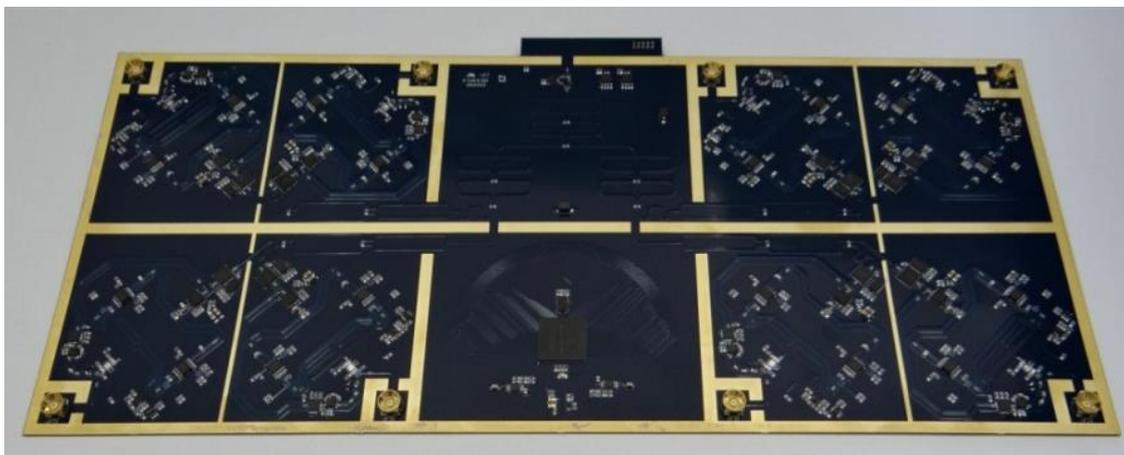


Рис. 5. Внешний вид печатной платы 8 приёмо-передающих каналов макета ППМ.

Внешний вид макета ППМ в сборе представлен на рис. 6.

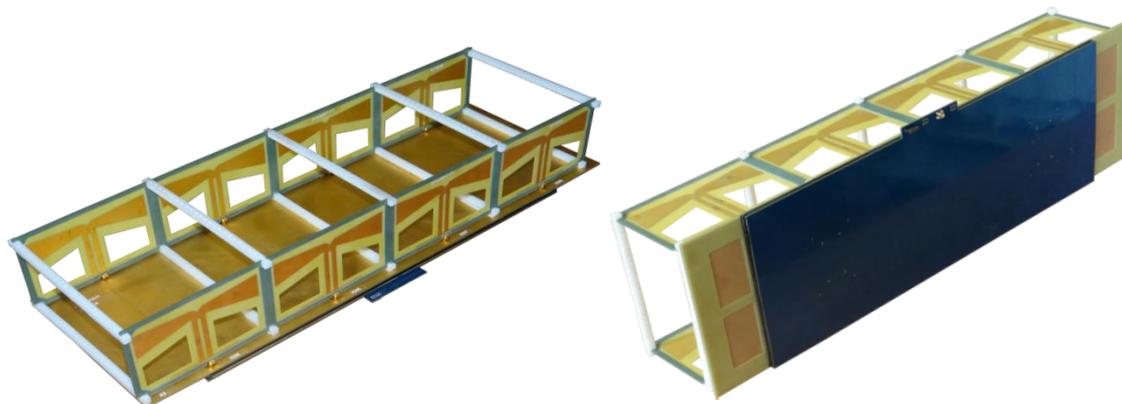


Рис.6. Внешний вид макета ППМ.

Габаритные размеры макета ППМ с излучателями составляют 490x175x90 мм. Масса ППМ составляет 450 г.

Разработанная активная фазирующая восьмиканальная антенная решётка прямоугольной формы для использования в активном режиме зондирования лунного грунта позволяет снизить в разы массогабаритные

параметры РЛК-Л, для повышения эффективности заполнения пространства устанавливаемого на перелётном модуле при работе в активном режиме.

2.Методики измерения параметров

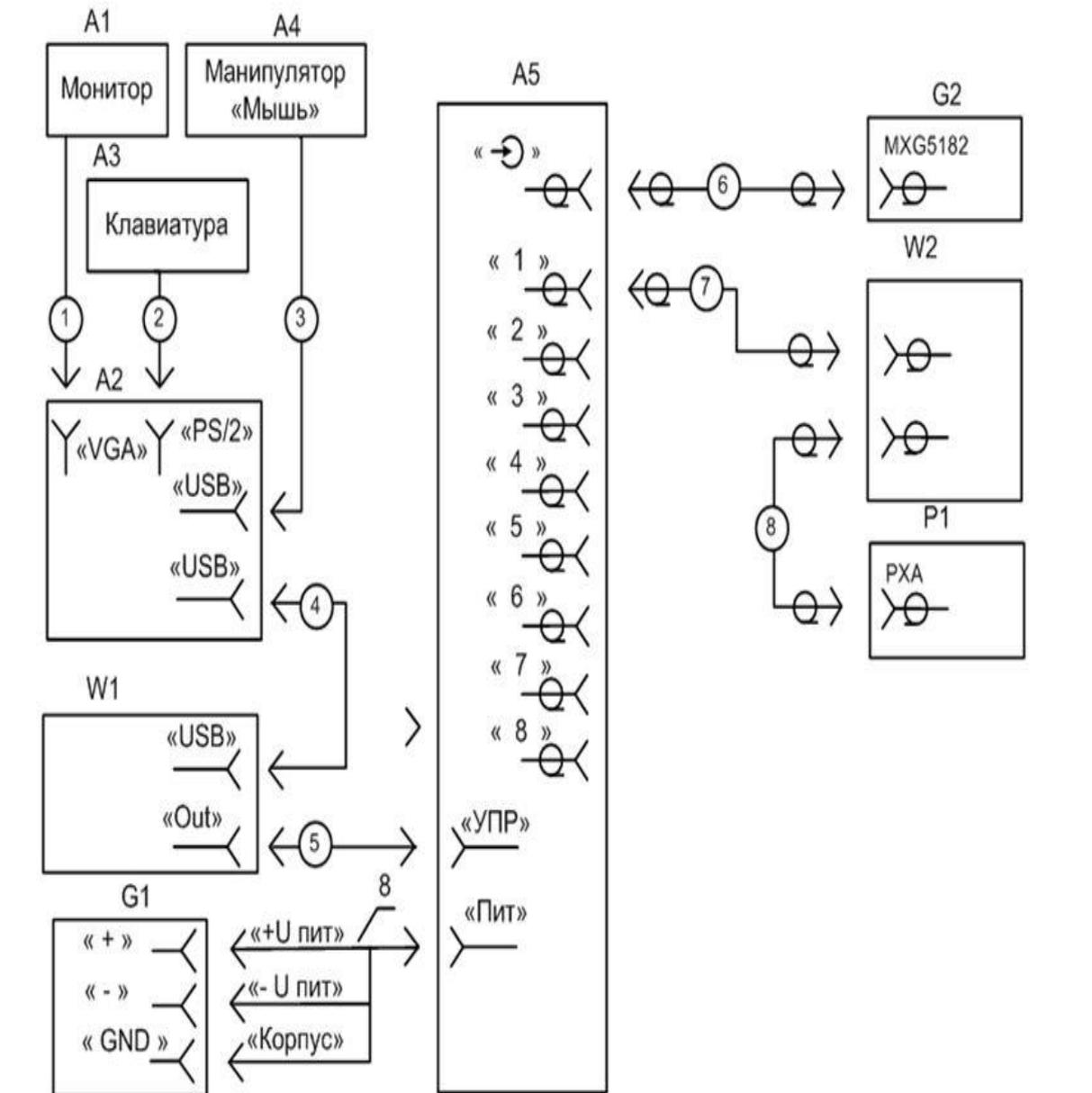
Целью проведенных экспериментальных исследований ППМ являлась оценка отдельных электрических характеристик ППМ в режиме приёма и передачи для уточнения характеристик АФАР РЛК-Л. При подготовке экспериментальных исследований макета ППМ (АФАР) разработаны схемы измерений (выходной мощности ППМ, регулировки фазы в режиме передачи и приёма), стендовое оборудование, на котором были осуществлены экспериментальные измерения параметров ППМ.

Для проведения экспериментальных исследований макета ППМ были разработаны методики и схемы измерений, стендовое оборудование. В рамках программы экспериментальных исследований проверялись следующие параметры:

- выходная импульсная мощность одного канала ППМ в режиме диапазон регулировки коэффициента передачи каналов модуля в режиме передачи;
- диапазон регулировки фазы в режиме передачи;
- диапазон регулировки фазы в режиме приёма;
- диапазон регулировки коэффициента передачи в режиме приёма;
- массы ППМ.

Импульсная выходная мощность в режиме передачи измерялась посредством подачи на ППМ импульсного сигнала и измерения мощности на выходах каналов. Использовался измеритель мощности радиосигнала ImmersionRC и 30dB аттенюатор (35Mhz-5.8Ghz). Схема измерений параметров ППМ представлена на рис. 7.

Диапазон регулировки коэффициента передачи измерялся также посредством подачи на вход ППМ импульсного сигнала и последующего измерения диапазона изменений мощности на выходе каналов ППМ при регулировке значения затухания аттенюаторов каналов ППМ.



- | | |
|------------------------------------|---|
| A1 – монитор; | P1 – анализатор PXA; |
| A2 – системный блок; | W1 – контроллер STM32F4; |
| A3 – клавиатура; | W2 – аттенюатор; |
| A4 – манипулятор «Мышь»; | 1,2,3,4 – кабели из состава ПЭВМ; |
| A5 – макет ППМ; | 5 – из состава контроллера STM32F4; |
| G1 – источник питания
HY30001E; | 6 – кабель из состава генератора G2; |
| G2 – генератор MXG5182; | 7,8 – кабель из состава анализатора P1; |
| | 9 – жгут питания. |

Рис. 7. Структурная схема для измерений параметров ППМ.

Диапазон регулировки фазы в режиме передачи измерялся посредством подачи на вход ППМ импульсного сигнала. При этом на выходе каналов ППМ

изменялись изменения его фазы. Регулировка значения сдвига фаз осуществлялась в каналах фазовращателей. В режиме приёма величина диапазона регулировки фазы осуществлялась аналогично режиму передачи, но сигнал подавался на антенные входы каналов ППМ.

Диапазон регулировки коэффициента передачи в режиме приёма осуществлялся посредством подачи на антенные входы ППМ сигнала. Изменялся диапазон изменения его мощности на выходе ППМ при регулировке значения затухания аттенюаторов каналов ППМ.

Масса ППМ определялась взвешиванием собранного макета на весах.

Диаграмма направленности измерялась в режиме приёма посредством подачи на измерительную антенну сигнала, который принимался антенными элементами ППМ. Уровень сигнала на выходе измерялся при вращении ППМ на Опорно-поворотном устройстве (ОПУ) по азимуту в пределах от минус 90° до 90° .

На рис. 7. представлена структурная схема для измерений параметров ППМ. На рис. 8 представлен внешний вид рабочего места для измерений параметров ППМ.



Рис. 8. Внешний вид рабочего места для измерений параметров ППМ.

На рис. 9 представлен внешний вид окна программы управления ППМ.

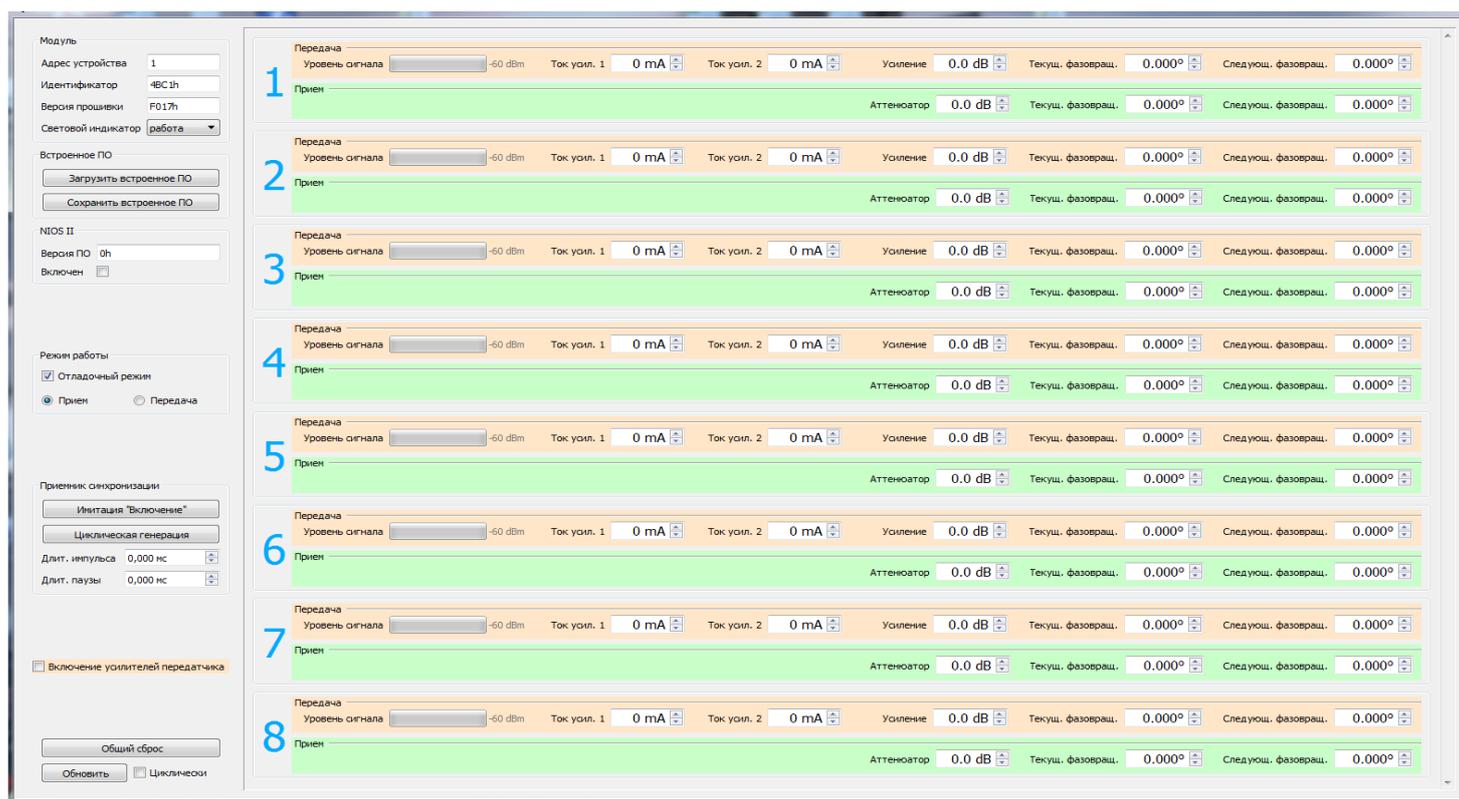


Рис.9. Внешний вид окна программы управления ППМ.

3. Результаты испытаний приёмно-передающего модуля

Дополнительно измерялись диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) излучателя в составе подрешётки, потребление энергии модулем.[3]

На рис. 10. приведена частотная зависимость КСВН одного из излучателей, при этом все остальные были нагружены на согласованные нагрузки.

КСВН по всему диапазону не превышает 1,5, что свидетельствует о низком уровне ослабления сигнала в излучателе.

Диаграмма направленности в режиме приёма при направлении максимума 0° и 33° относительно нормали к плоскости экрана приведена на рис. 11а и 11б.

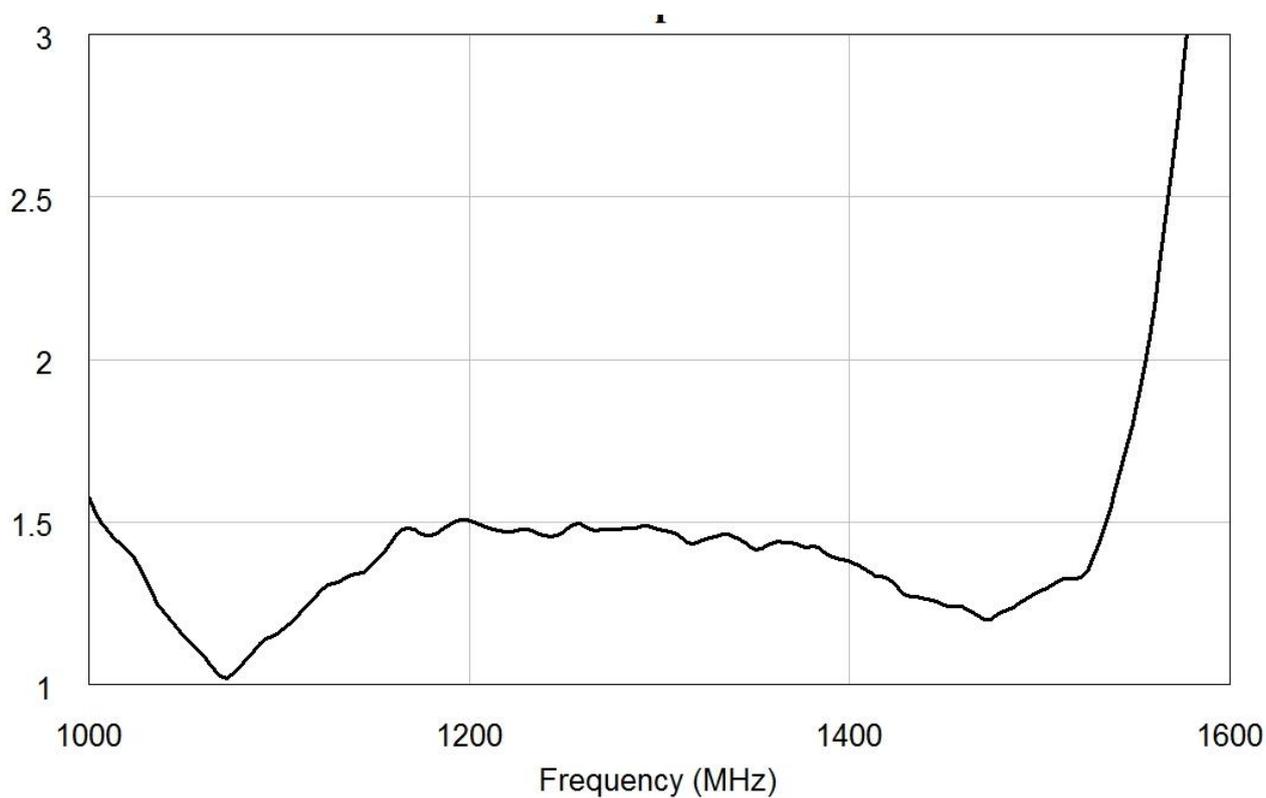


Рис. 10. График зависимости КСВН излучателя от частоты.

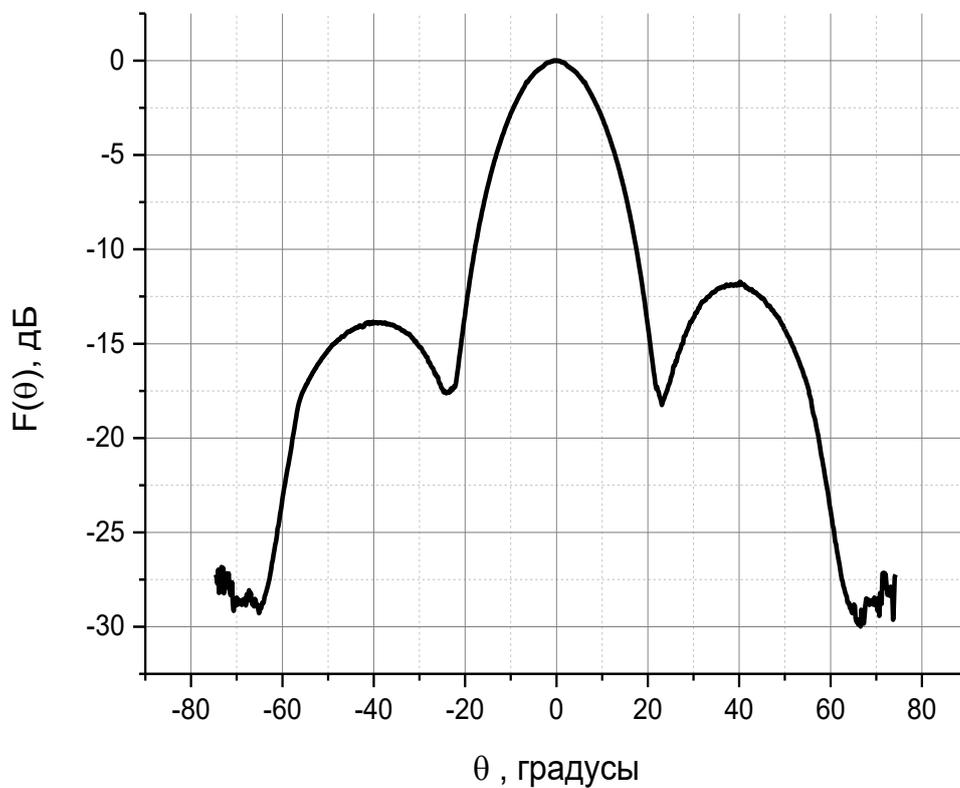


Рис. 11а. Диаграмма направленности макета ППМ в направлении 0° .

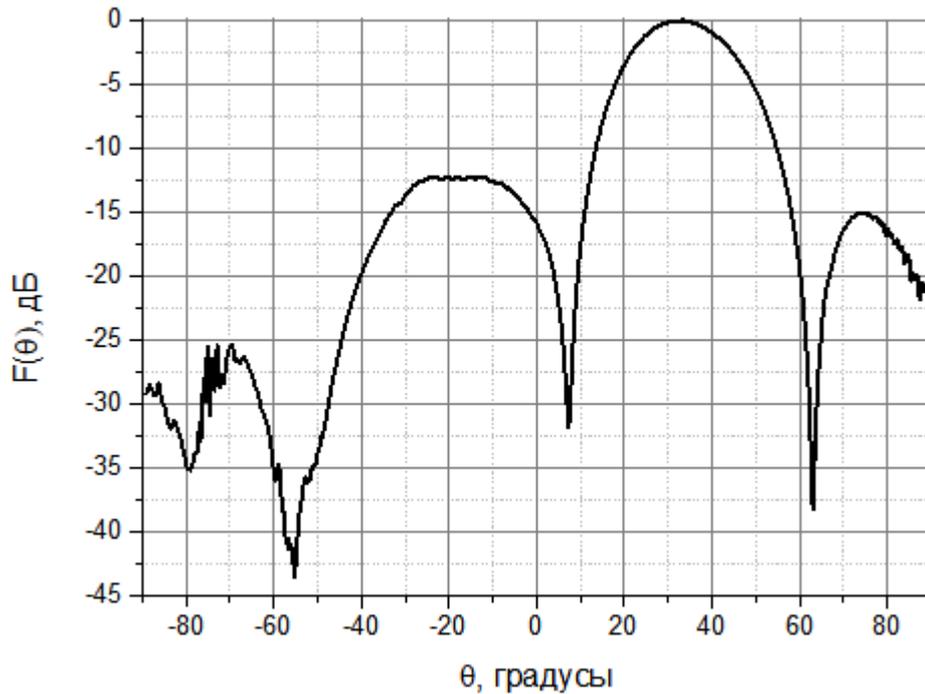


Рис. 116. Диаграмма направленности макета ППМ в направлении 33°.

Ширина диаграммы направленности по половинчатой мощности без отклонения максимума равна 23°. Это соответствует предварительным расчётам. Оценка КПД ППМ в режиме передачи составила 22,8%.

Проведённые экспериментальные исследования разработанного приёмно-передающего модуля РЛК-Л для зондирования лунного грунта соответствует разработанным техническим требованиям и обеспечивает:

- приём радиосигналов в диапазоне частот 1200-1400 МГц по восьми каналам с независимой регулировкой их фазы в диапазоне не менее 355° с шагом не более 5,625° и амплитуды в диапазоне не менее 28 дБ с шагом не более 1 дБ;
- излучение радиосигналов по 8 каналам с импульсной мощностью не менее 1,5 Вт с независимой регулировкой их фазы в диапазоне не менее 355° с шагом не более 5,625° и амплитуды в диапазоне не менее 28 дБ с шагом не более 1 дБ.
- КСВН излучателя в пределах рабочего диапазона частот не превышает 1,5.
- ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности - 23°;
- КПД ППМ в режиме передачи - 22,8%.

Заключение

Результаты измерений показывают, что макет ППМ в составе с АФАР обеспечивает пространственное подповерхностное сканирование лунного грунта [4], посредством создания узкой диаграммы направленности и быстрого сканирования луча в пространстве за счёт современной электронной базы компонентов и микроконтроллера (из списка разрешенных) который в свою очередь программно управляет изменением усиления амплитуды и сдвига фазы СВЧ сигнала, что позволяет обеспечить модуль CPU-L (ЭВМ) необходимыми переменными данными для построения 3D картинки с хорошим разрешением с высот от 100 км до 150 км [5]. Реализация антенной системы на базе АФАР обеспечивает формирование расчётного значения формы диаграммы направленности (далее ДН) и высокую гибкость работы РЛК-Л за счёт возможности электронного сканирования ДН по заданному алгоритму, что в свою очередь повысит точность и качество исследования подповерхностного лунного грунта. Массогабаритные параметры позволяют разместить ППМ на перелётном модуле.

Литература

1. Воскресенский Д.И., ред. *Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решёток. Учебное пособие.* Москва, Радио и связь. 1994.
2. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. и др. *Конструирование экранов и СВЧ-устройств.* Москва, Радио и связь. 1990.
3. Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. *Активные фазированные антенные решетки.* Москва, Радиотехника, 2004.
4. Смирнов В.М., Юшкова О.В., Марчук В.Н., Абрамов В.В. , Квылинский Ю.Ф, Ляхов Ю.Н. Проект Луна-Глоб: радиолокационное зондирование грунта Луны. *Радиотехника и электроника.* 2013. Т.58. № 9. С.926-934.
5. Семенов Д.А. Применение приёмно-передающей активной фазированной

антенной решётки в радиолокационном комплексе зондирования лунного грунта. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.5>

Для цитирования:

Семенов Д.А. Экспериментальные исследования приёмно-передающего модуля радиолокационного комплекса зондирования лунного грунта. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.8>