

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.5>  
УДК 520.6.07

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИЁМНО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ 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 6 мая 2021 г.

**Аннотация.** Раскрываются принципы радиолокационного зондирования лунного грунта. Анализируются характеристики приёмно-передающей активной фазированной антенной решётки и возможности ее использования при передаче/приёме зондирующего радиолокационного сигнала при исследовании лунного грунта в активном режиме с перелетного научного модуля.

**Ключевые слова:** разрешающая способность локации, доплеровское смещение, активная фазированная антенная решётка, отражённый сигнал, георадар, сканирование грунта, приёмно-передающий модуль, фазовращатель, излучатель.

**Abstract.** The principles of radar sounding of lunar soil are revealed. The characteristics of the receiving-transmitting active phased antenna array and the possibility of its use in the transmission/reception of the probing radar signal in the study of lunar soil in the active mode from the flight scientific module are analyzed.

**Key words:** resolution locations, Doppler shift, active phasing antenna array, echo, ground-penetrating radar, scanning the ground, the receiving-transmitting module, shifter, radiator.

### Введение

Исследование Луны и планет земной группы позволяет использовать активные методы исследования, в рамках которых оно проводится с

перелетных исследовательских космических модулей, лунных станций, на которых устанавливается специальная аппаратура. Активные методы позволяют сделать исследование более информативным, получить более точные характеристики различных объектов. Луна, как объект исследования, изучается в различных научных аспектах, но приоритетным является исследование лунного грунта, содержащего редкоземельные соединения, что делает коммерчески эффективными такие исследования, так как доставка этих соединений с Луны технически выполнима и экономически обоснована.

Среди активных методов исследования лунного грунта достаточно информативным является его георадиолокация, основывающаяся на корреляционной обработке принимаемых отражённых сигналов и излучаемых зондирующих, параметры которых (мощность, частотно-временные, поляризационные) известны с высоким уровнем точности. Это позволяет реализовать очень высокую точность доплеровского смещения и запаздывания через отношение сигнал/шум. Современные георадары характеризуются высокой разрешающей способностью, многократно превосходящей такую же у оптических телескопов.

Радиолокационное зондирование лунного грунта возможно методами активной и бистатической радиолокации. В активном режиме с целью радиолокационного исследования на перелетном модуле устанавливается радиолокационный комплекс, который вращается вокруг Луны на полярной круговой орбите на высоте 100-150 километров от лунной поверхности [1]. Радиолокационный комплекс посылает зондирующий радиолокационный сигнал на поверхность лунного грунта, принимает отражённый, обрабатывает полученный сигнал. На современном этапе развития георадаров для получения более высококачественной съемки в активном режиме работы оптимально использовать георадар 3D, который будет сканировать лунный грунт по поверхности «качающимся лучом», что позволит получать 3-мерную картину поверхностных слоев лунного грунта.

При использовании георадара на перелётном модуле важно оптимальное

соотношение разрешающей способности радиолокации и минимального энергопотребления, глубины зондирования грунта. Оптимум находится в коротковолновом диапазоне. В результате отечественных и зарубежных исследований выявлено, что диапазон частот 50-900 МГц является оптимальным для достижения глубины зондирования от 0,1 до 10 метров и высокой разрешающей способности [2].

Эффективность георадара обеспечивается применением сверхширокополосных антенн. Для зондирования лунного грунта необходима малогабаритная сверхширокополосная антенна. Создать её можно на основе активной фазирующей антенной решетки с узким лучом диаграммы направленности и функционирующую в многоканальном режиме, что позволит осуществлять сканирование грунта с большей скоростью и разрешением.

При разработке приемно-передающего модуля на основе активной фазированной антенной решётки важно, предварительно рассмотреть её основные характеристики и преимущества для решения задачи по сканированию лунного грунта с перелётного космического модуля в активном режиме. При этом необходимо учитывать основные физические принципы зондирования лунного грунта методами радиолокации в активном режиме с перелётного космического модуля.

## **1. Принципы радиолокационного зондирования лунного грунта**

В основе георадиолокации лежит физический принцип отражения электромагнитной волны от границ между слоями среды, у которых разная диэлектрическая проницаемость. Как правило, зондирующий георадиолокационный сигнал находится в диапазоне частот от ~10 МГц - 2 ГГц. Чем больше длина волны сигнала, тем больше глубина проникновения зондирующего сигнала, но меньше разрешающая способность. При георадиолокации грунта глубиной от 0,1 до 15 метров наиболее оптимален диапазон частот 50-1500 МГц [2]. Зондирующий сигнал в данном частотном диапазоне позволяет добиться приемлемой глубины георадиолокации с достаточно высокой разрешающей способностью. Чем больше показатель

диэлектрической проницаемости исследуемой среды, тем меньше глубина георадиолокации. При этом диэлектрическая проницаемость среды находится в корреляционной зависимости от влагонасыщенности среды (грунта).

С учётом отмеченных характеристик (длина волны, диэлектрическая проницаемость) Луна является оптимальным объектом для георадиолокации, так как на ней нет атмосферы, что позволяет использовать коротковолновой диапазон, а лунный грунт характеризуется низковлагонасыщенностью [2]. Отмеченные характеристики лунного грунта позволяют при георадиолокации обеспечить оптимальное соотношение между характеристиками разрешения и глубины зондирования.

Радиолокационное исследование лунного грунта основывается на анализе спектральных характеристик коэффициента отражения  $R(f)$  ( $f$  - частота) радиоволн от поверхности Луны и подповерхностных слоев грунта.

Когда сигнал на частоте  $f$  с высоты посылается на изучаемую поверхность грунта с высоты  $h_v$ , то на ней формируется зона Френеля. Её размеры можно определить по формуле:

$$z_f = \sqrt{\frac{ch_v}{f}} \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света.

На рис. 1 представлена геометрия зондирования грунта радиолокационным комплексом с перелётного модуля, находящегося на высоте  $h_v$ .

В соответствии с теорией Френеля каждая точка зоны Френеля становится вторичным излучателем сигнала, формируя отражённый сигнал. Зависимость  $R(f)$  от частоты обуславливается 2 факторами:

- слоистая структура грунта и интерференция волн, отраженных от границ меду слоями;
- зависимость частоты от диэлектрической проницаемости внутренних слоёв [4].

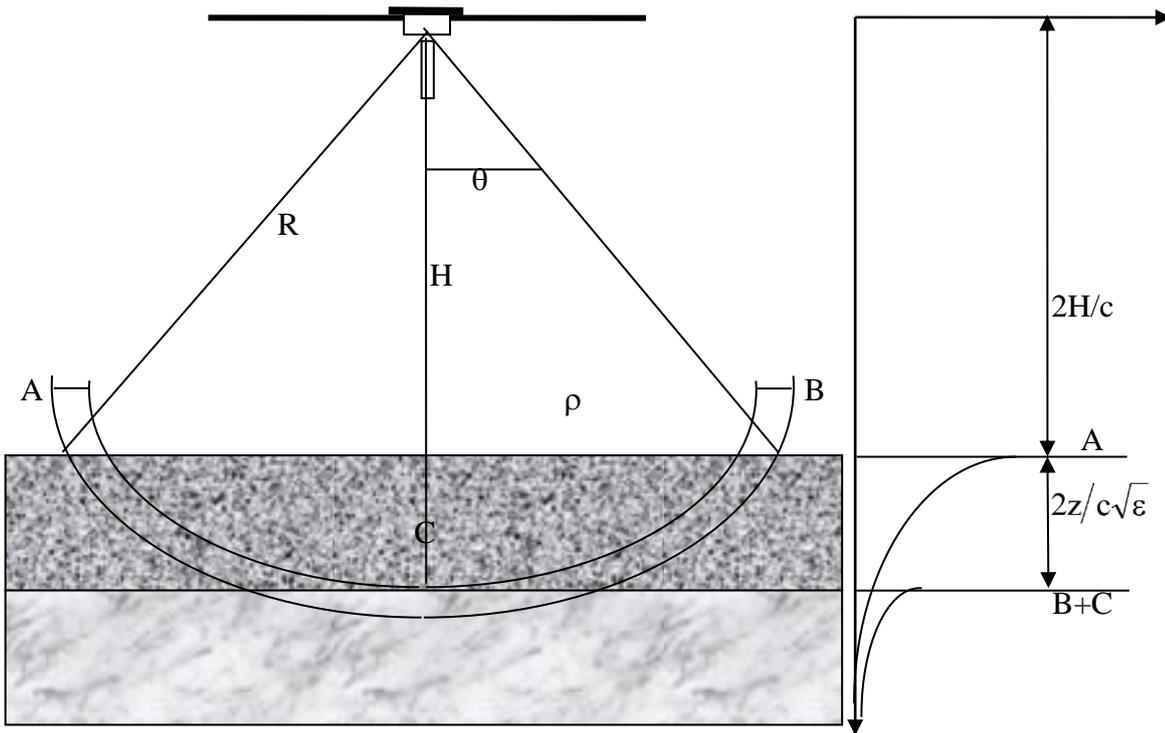


Рис. 1. Геометрия зондирования грунта радиолокационным комплексом с перелётного модуля, находящегося на высоте  $h_v$ .

На рис. 2. представлена функция  $R(f)$  в зависимости от толщины слоя грунта и частоты зондирующего сигнала.

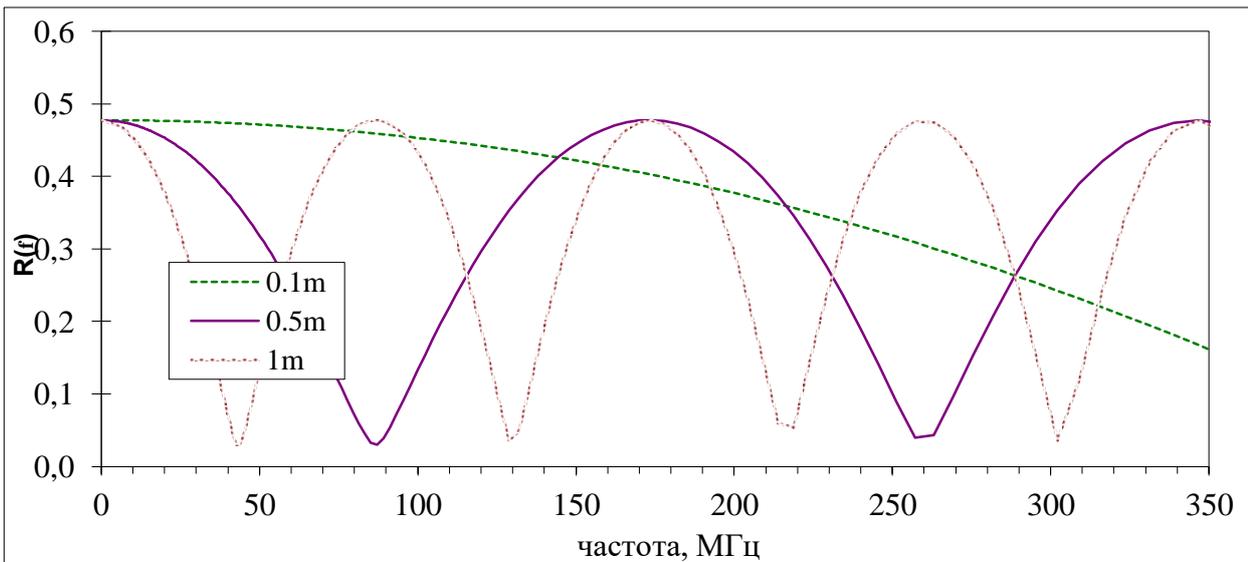


Рис. 2. Вид коэффициента отражения в зависимости от толщины слоя грунта и частоты зондирующего сигнала.

Формируется интерференционная картина с максимумами и минимумами.

Максимум амплитуды можно определить по формуле:

$$\frac{4\pi f_{\min}^{(l)}}{c} \sqrt{\varepsilon_1'} \quad L = (2l-1)\pi \quad (l=1,2,\dots) \quad (2)$$

минимум - по формуле:

$$\frac{4\pi f_{\max}^{(l)}}{c} \sqrt{\varepsilon_1'} \quad L = 2l\pi \quad (l=1,2,\dots), \quad (3),$$

$\Delta f$  между максимумом и минимумом определяется следующим образом:

$$\sqrt{\varepsilon_1'} L = \frac{c}{2\Delta f}, \quad (4)$$

где

$$R_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_1'} + 1} - \text{коэффициент отражения от верхней границы слоя;}$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{\varepsilon_2'/\varepsilon_1'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_2'/\varepsilon_1'} + 1} - \text{коэффициент отражения от нижней границы слоя.}$$

Они определяются по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{1 + R_{\max} R_{\min} - \sqrt{(1 - R_{\max})(1 - R_{\min})}}{R_{\max} + R_{\min}} \quad (5),$$

$$R_2 e^{-\tau} = \frac{1 - R_{\max} R_{\min} - \sqrt{(1 - R_{\max})(1 - R_{\min})}}{R_{\max} + R_{\min}} \quad (6),$$

Интерполяционная формула  $\varepsilon' = 1,93^\rho \rightarrow$  плотность грунта  $\rho \rightarrow$  отношение  $tg\Delta/\rho = b$ .

На рис. 3. приведены результаты численного моделирования диэлектрической проницаемости.

С повышением частоты излучения снижается глубина зондирования, так как модуль коэффициента отражения уменьшается на меньших глубинах грунта, однако, с ростом частоты повышается разрешение. Поэтому для глубинного зондирования можно использовать радар с частотой излучения, близкой к 20 МГц, а для сканирования лунного грунта с высокой точностью

результатов на малых глубинах, можно использовать радар с излучением с частотой выше 1000 МГц.

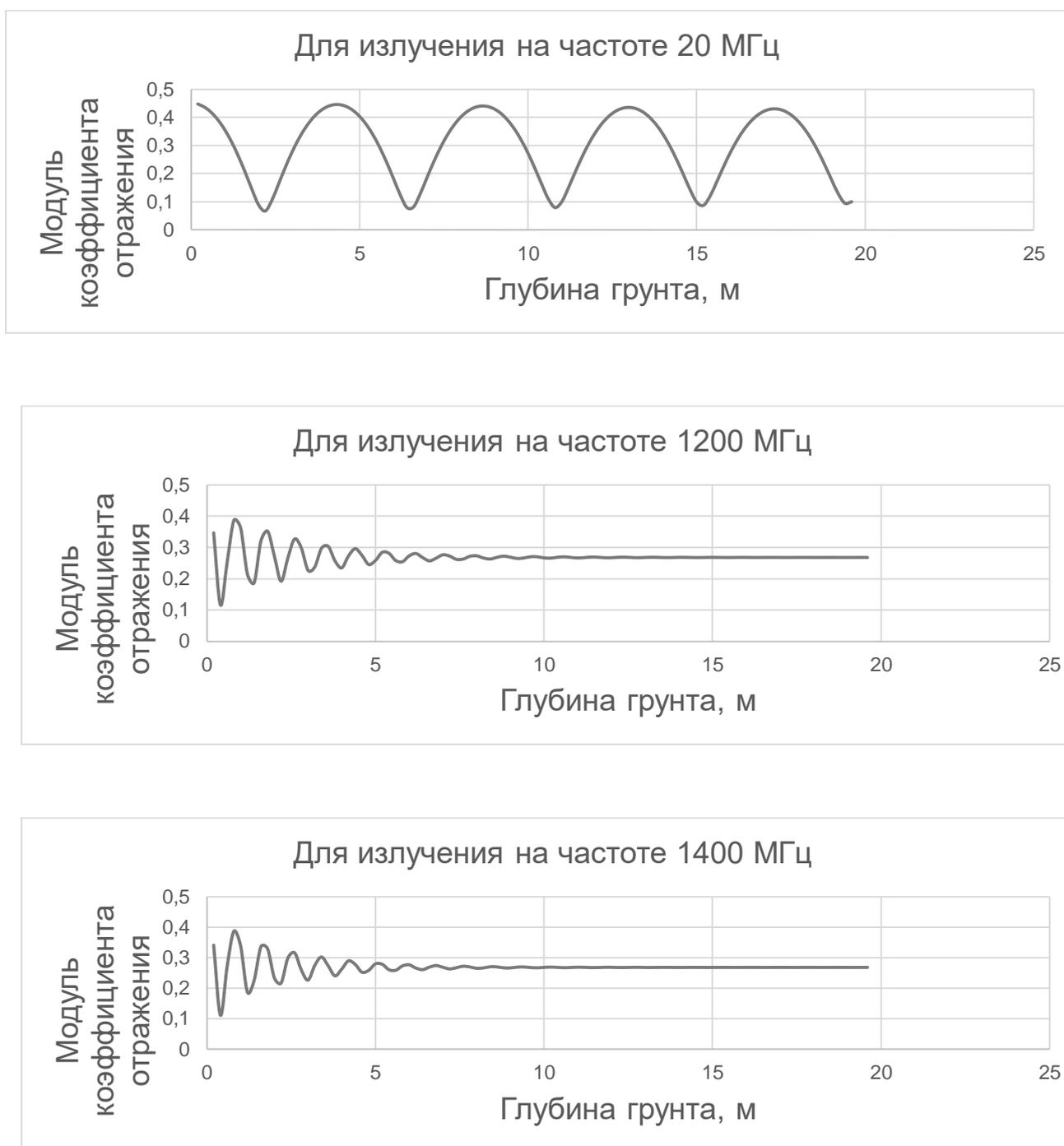


Рис. 3. Результаты численного моделирования диэлектрической проницаемости.

Радиолокационный комплекс для зондирования лунного грунта может работать в трёх режимах:

1. Активный – радиолокационный комплекс находится на высоте 100-150 км от лунной поверхности. Передача зондирующего сигнала осуществляется с радиолокационного комплекса и прием отраженного сигнала осуществляется так же на нём.
2. Бистатический – радиолокационный комплекс находится на высоте 100-150 км от лунной поверхности. Зондирующий сигнал излучается мощным передатчиком с Земли на несущей частоте 17-23 МГц. Передатчик бортового радиолокационного комплекса отключен.
3. Пассивный – электромагнитное излучение регистрируется радиолокационным комплексом в пассивном режиме при отключенных передатчиках.

В активном режиме необходимо более узкое сканирование лунного грунта и высокий уровень разрешения. Эти характеристики можно получить за счёт использования активной фазированной антенной решётки, а так же 3D-георадара. Для активного режима с использованием зондирования лунного грунта с использованием активной фазированной антенной решётки оптимален длина волны  $\lambda = 0.23\text{м}$ , что позволит обеспечить минимальные потери и горизонтальную поляризацию сигналов.

## **2. Характеристики приёмно-передающей активной фазированной антенной решётки и возможности ее использования при передаче/приеме зондирующего радиолокационного сигнала при исследовании лунного грунта в активном режиме с перелетного научного модуля**

Важной характеристикой любой антенны является направленность действия, которая показывает насколько коэффициент усиления в одном направлении больше, чем в другом. Направленность простого вибратора низкая, поэтому для увеличения направленности используют антенные решётки, представляющие систему вибраторов, причём все они ориентированы в пространстве в одном направлении. Узкая диаграмма направленности антенной решётки по вертикали обеспечивает ей высокий коэффициент усиления. Узкую диаграмму направленности получают за счёт антенной

решётки, которая включает нескольких коллинеарно расположенных излучателей. Используют общую схему питания с параллельным или последовательным подключением. Первое делает антенную решётку более широкополосной [5].

Самая простая антенная решётка плоская. Она состоит из полуволновых вибраторов, которые располагают многорядно и в несколько этажей. Все вибраторы соединяются фидерами. Принимаемые вибраторами сигналы складываются в фазе в точках питания вибраторов, формируя сигнал с мощностью суммы всех вибраторов. К ним подключают приёмное устройство. Плоские антенные решётки концентрируют излучение в двух плоскостях. Конструктивно вибраторы расположены в узлах прямоугольной или гексагональной сетки (рис. 4).

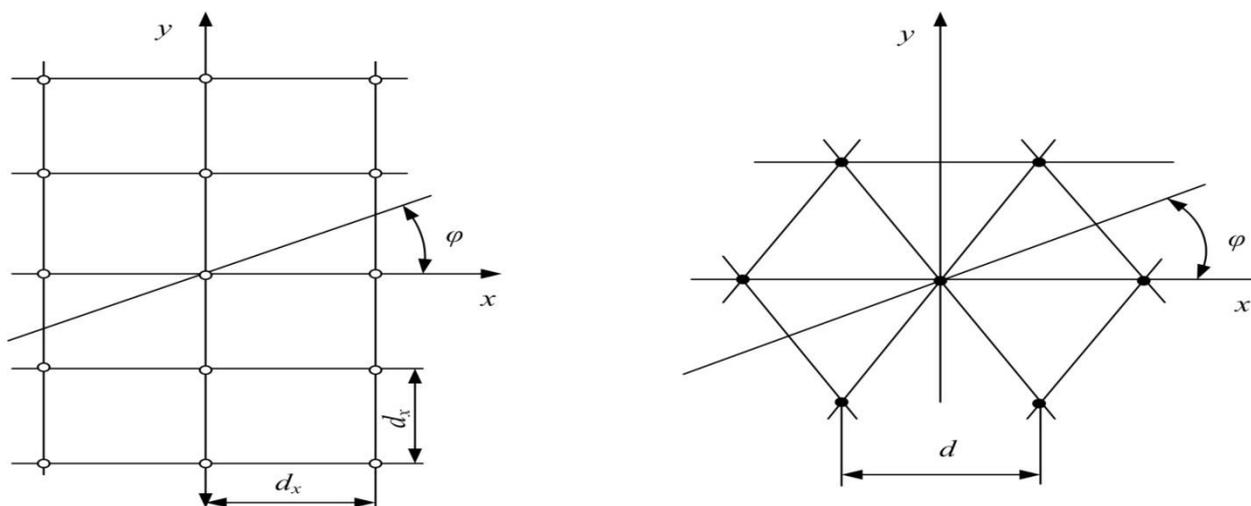


Рис. 4. Плоские антенные решетки.

В синфазной антенной решётке фазы всех излучателей равны, в связи с чем суммарный луч диаграммы направленности расположен перпендикулярно плоскости антенны (рис. 5).

В фазированной антенной решётке в фидеры синфазной решётки вводятся фазовращатели, позволяющие менять фазу сигнала в каждом излучателе. В определённом направлении сигналы приходят синфазно, усиливая друг друга.

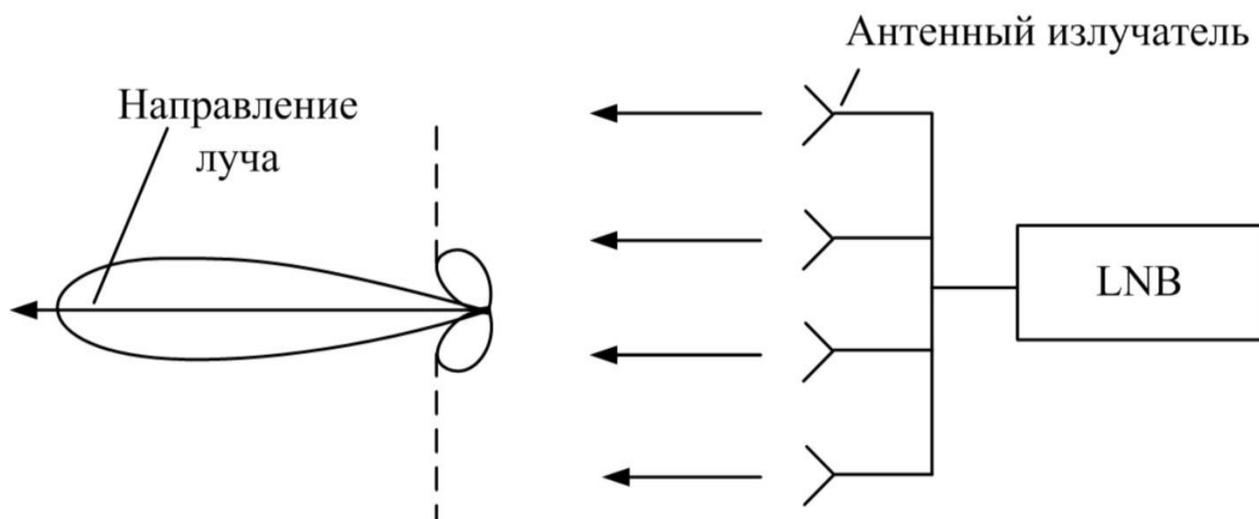


Рис.5. Синфазная антенная решётка.

Диаграмма направленности в такой решётке формируется организованной интерференцией излучаемых волн. В фазированной антенной решётке обеспечивают необходимое амплитудно-фазовое распределение, причём оно может управляемо меняться, что позволяет качать луч в секторе пространства [6].

При зондировании лунного грунта важно не только иметь высокую разрешающую способность, но представлять полученные данные в наглядной форме. Это обеспечивается использование для зондирования лунного грунта в активном режиме георадара с активной фазирующей антенной решётки.

Антенная система для сканирования лунного грунта в активном режиме с перелётного модуля должна иметь следующие характеристики-преимущества перед другими антенными системами:

1. Для обеспечения точности сканирования лунного грунта в активном режиме антенная система должна узкий луч и высокий уровень разрешающей способности по угловым координатам.
2. Высокий уровень отказоустойчивости.
3. Антенная система должна позволять быстро «качать» луч в активном режиме, что позволит управляемо изменять зоны сканирования.
4. Антенная система должна иметь сниженные массогабаритные характеристики.

5. Антенная система не должна быть дорогой.
6. Повышенные функциональные возможности.
  - Узкий луч и высокая разрешающая способность в активной фазированной антенной решётке обеспечивается наличием  $N$  излучателей, что увеличивает в  $N$  раз направленность и коэффициент усиления антенны, позволяет сузить луч.
  - Благодаря высокому уровню электрической прочности активная фазированная антенная решётка характеризуется высоким уровнем отказоустойчивости.
  - Активная фазированная антенная решётка позволяет «качать» луч диаграммы направленности электрическими методами.
  - Конструкторско-технологические характеристики активной фазированной антенной решётки позволяют уменьшать её размеры и массу.
  - Как отмечалось выше, в активной фазированной антенной решётке у каждого излучателя свой приемопередающий модуль, что повышает функциональные возможности.

Таким образом, активная фазированная антенная решётка более эффективна для зондирования лунного грунта в активном режиме с перелётного модуля.

Активная фазированная антенная решётка может быть выполнена в форме цилиндра, двух полуцилиндров, плоская с механическим вращением по кругу и возможностью электронного сканирования луча.

Цилиндрическая антенная фазированная активная решётка позволяет осуществлять электронное сканирование лучом, менять алгоритм сканирования. Её целостное конструктивное исполнение позволяет разместить её в центре перелётного модуля. Диаметр и высота цилиндра обуславливаются необходимой дальностью и допустимой погрешностью сканирования лунного грунта.

Два полуцилиндра можно применять, если по конструктивным решениям перелётного модуля нельзя разместить антенну в центре перелётного модуля. Но ограниченность по размерам перелётного модуля не позволяет использовать вариант активной фазированной антенной решётки в форме двух полуцилиндров. Трудно также синхронизировать работу двух полуцилиндров, представляющих, в сути две активных фазированных антенных решётки.

Плоская активная фазированная антенная решётка с механическим вращением характеризуется компактностью антенной системы, но она не позволяет гибко менять алгоритм сканирования лунного грунта.

Таким образом, из отмеченных конфигураций для сканирования лунного грунта в активном режиме с перелётного модуля наиболее эффективная антенная решётка цилиндрической формы, что обуславливается следующим:

- возможностью разместить её в центре перелётного модуля;
- малогабаритностью антенной решётки, что важно в условиях ограничения перелётного модуля по габаритам;
- возможностью гибкого изменения алгоритма сканирования.

## **Заключение**

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.

В условиях космических исследований оборудование для перелётного модуля ограничено по массе и размерам. Активная антенная фазированная антенная решётка может быть размещена в центре перелётного модуля, её изготовление печатным способом позволяет обеспечить низкую стоимость активной фазированной антенной решётки. Цилиндрическая решётка также позволяет гибко изменять алгоритм сканирования.

Проведённый анализ основных принципов сканирования лунного грунта с перелётного модуля позволил обосновать эффективность использования активной фазированной антенной решётки цилиндрической формы для приёмно-передающего модуля радиолокационного комплекса, осуществляющего сканирование лунного грунта с перелётного модуля в активном режиме.

### Литература

1. Семенов Д.А., Квылинский Ю.Ф., Фролов Е.С. *Радиолокационное зондирование Луны и принцип работы научной аппаратуры: доклад*. Москва, Специальное Конструкторское Бюро Института Радиотехники и Электроники Российской Академии Наук. 2014.
2. *Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография*. Под редакцией Гринева А.Ю. Москва, Радиотехника, 2005. 416 с.; Резников А.Е. и др. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения. *УФН*. 2000. Т.170. №5. С.565-568.
3. Покровский С.Г. Лунный грунт. В сборнике: *Цивилизация знаний: российские реалии. Труды Пятнадцатой Международной научной конференции в 2-х частях*. Москва. 2014. С.299-304.
4. Юшкова О.В., Яковлев О.И. Анализ возможностей определения

характеристик грунта Луны методом бистатической радиолокации.  
*Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62. №1. С.26-34.

5. Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. *Активные фазированные антенные решетки*. Москва, Радиотехника. 2004.
6. *Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решёток. Учебное пособие*. Под ред. Д. И. Воскресенского. Москва, Радио и связь. 1994.

**Для цитирования:**

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>