

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.13>

УДК: 621.3.091.22

УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В.В. Антипов, Д.А. Смирнов, В.И. Сахтеров

**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
108840 Москва, Троицк, Калужское шоссе д.4 Россия**

Статья поступила в редакцию 8 июня 2026 г.

Аннотация. В настоящее время существует широкое разнообразие радиолокационных приборов, применяемых как для радиолокации свободного пространства, так и для подповерхностной радиолокации. Цель данной работы – теоретически и экспериментально обосновать возможность увеличения дальности подповерхностной радиолокации за счёт повышения мощности излучаемого сверхширокополосного сигнала и оптимизации характеристик антенно-фидерных устройств. Основными методами исследования являлись расчёты по рекомендациям Международного союза электросвязи (МСЭ) для свободного пространства, а также натурные измерения параметров дипольных и резистивно-нагруженных дипольных антенн на полуцилиндрическом измерительном стенде. Показано, что малоглубинные георадары с динамическим диапазоном 135 дБ могут обеспечить радиолокацию на расстоянии до 1 км на частотах ниже 40 МГц, а глубинные георадары с динамическим диапазоном 154 дБ – до 1 км на частотах до 420 МГц. Экспериментально установлено, что эффективность резистивно-нагруженных дипольных антенн по первым импульсам составляет 43-45 %, а общий КПД системы при использовании двух антенн – около 22 %. Обнаружено, что снижение сопротивления вибраторов ниже 250 Ом может приводить к паразитным автоколебаниям. Полученные

результаты подтверждаются практическими данными зондирования до глубин 150-200 м и более в районах вечной мерзлоты. Таким образом, увеличение амплитуды излучаемого сигнала в n раз повышает дальность радиолокации пропорционально $\sqrt{n}$, что открывает перспективы создания георадаров с дальностью действия до нескольких сотен метров и более.

Ключевые слова: георадар, антенны, диаграмма направленности, обработка сигналов.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке грантом РНФ № 22-12-00083-П

Автор для переписки: Смирнов Дмитрий Андреевич, dsmirnov@izmiran.ru, diman.smirny@yandex.ru

Введение

В настоящее время существует широкое разнообразие радиолокационных приборов, применяемых как для радиолокации свободного пространства, так и для подповерхностной радиолокации. Радиолокация подповерхностных сред является частным случаем классической радиолокации свободного пространства, использующей в своей основе формулу радиолокации. Основные отличия для подповерхностной радиолокации состоят в разнице характеристик твердых и полупроводящих сред: диэлектрическая проницаемость значительно выше единицы, что влияет на скорость распространения в средах; более высокое поглощение сигнала – влияет на дальность радиолокации; тангенс угла потерь – проявляется при высоких значениях напряженности излучаемого поля.

1. Теоретические расчеты дальности радиолокации георадарами

Наиболее успешно подповерхностная радиолокация применяется для исследования материковых ледников. Начало этим работам было положено в 1957 году после обнаружения А. Уэйтом, что радиовысотомер самолета, стоящего на леднике, показывает высоту полета 900 футов [1]. Подобный результат фиксировался также и при полете над ледниками [2]. Для сред в виде

осадочных пород ослабление достигает значений до 20-30 дБ/м, что ограничивает дальность радиолокации до единиц метров. В то же время в горных породах, имеющих ослабление ниже 0,1 дБ/м, еще в 60-е годы получали радиолокационные отражения с расстояний 70 м при работах в шахтах с исследуемыми породами доломита [3].

В классической формуле радиолокации предполагается, что передающая и приемная антенны могут располагаться на разных расстояниях от цели. Преобразуем формулу принимаемой мощности радиолокации для случая, когда передающая и приемные антенны находятся на одинаковом расстоянии от цели, т. к. у георадаров они располагаются на небольшом расстоянии друг от друга и производят измерения между антеннами:

$$P_R = \frac{P_T G_T A_R \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}, \quad (1)$$

где:

P_R – мощность сигнала приемной антенны,

P_T – мощность радиопередатчика,

G_T – коэффициент усиления антенны,

A_R – эффективная площадь приемной антенны,

σ – эффективная площадь рассеивания цели в данном ракурсе,

F – коэффициент потерь при распространении,

R – расстояние от антенны до цели.

В ряде публикаций [4,5] по георадиолокации теоретически предполагается, что в средней полосе России глубина зондирования ограничивается 30 м. Формула радиолокации (1) в этих публикациях приведена с некоторыми допущениями, что сильно влияет на получаемый результат. Если не брать исключительные случаи исследуемых подповерхностных сред, как-то, к примеру, влажные солончаки с полным затуханием электромагнитных волн (ЭМВ) или специфические руды с большим содержанием электропроводящих окислов металлов, то в большинстве случаев нет теоретических ограничений

для увеличения расстояния радиолокации, кроме необходимости достижения соответствующей излученной мощности.

С другой стороны, авторы этих публикаций обычно указывают, что потери ЭМВ при распространении в воздухе равны 0, но согласно рекомендациям сектора радиосвязи Международного Союза Электросвязи (МСЭ), потери зависят от расстояния и частоты [6]. В рекомендациях есть формализованные формулы расчета потерь в свободном пространстве:

$$L_{br} = 32,4 + 20\log f + 20\log d, \quad (2)$$

где:

L_{br} – основные потери передачи в свободном пространстве (дБ),

f – частота (МГц),

d – расстояние (км).

В этой же рекомендации есть формула расчета основных потерь сигнала в свободном пространстве для радиолокационной системы:

$$L_{br} = 103,4 + 20\log f + 40\log d - 10\log \sigma. \quad (3)$$

Чувствительность приемников для георадаров при ширине полосы 300-500 МГц составляет 100 мкВ. Малоглубинные георадары применяют генераторы, формирующие сверхширокополосный (СШП) импульс амплитудой до 600 В, это означает, что динамический диапазон не превышает 135 дБ, и это без учета потерь на согласование в антенно-фидерном устройстве [7-9]. Современные глубинные георадары с амплитудой СШП импульса 5 кВ имеют динамический диапазон 154 дБ, с амплитудой 100 кВ – 180 дБ.

Для наглядности произведем расчет ослабления сигнала при распространении в свободном пространстве (2) для фиксированного расстояния между антеннами 1 км, для частот от 1 до 1000 МГц. Это диапазон частот, используемых современными георадарами. Как видно из графика на рис. 1, основные потери передачи находятся в диапазоне от 35 до 90 дБ, это означает возможность

осуществления связи на таком расстоянии устройствами с динамическим диапазоном свыше 100 дБ.

Далее рассчитаем потери сигнала при радиолокации (3) для фиксированного расстояния 1 км, поперечное сечение радиолокационной цели 1 м², изменение частоты радиолокация от 1 до 1000 МГц. Совместим полученные результаты с потерями в свободном пространстве (рис.1).

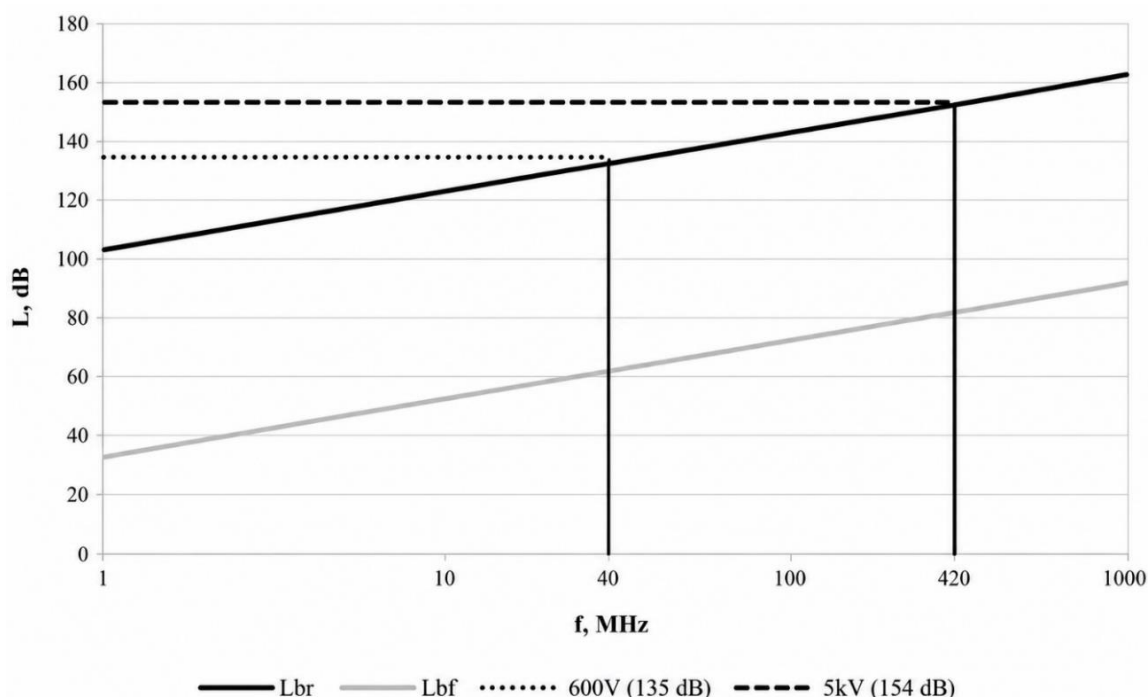


Рис. 1. Основные потери передачи в свободном пространстве для линий связи L_{br} , для радиолокационной системы L_{bf} и максимальные частоты радиолокации георадаров для МГР и ГГР.

Как видно из графика на рис. 1, в воздухе ($\epsilon = 1,01$) малоглубинный георадар (МГР) с динамическим диапазоном 135 дБ может производить радиолокацию на расстоянии 1 км при использовании рабочих частот ниже 40 МГц. Современные глубинные георадары (ГГР) с динамическим диапазоном 154 дБ имеют возможность проводить радиолокацию на расстоянии 1 км на частотах до 420 МГц [10-12].

Для наглядности определим дальности зондирования современных георадаров в воздухе, используя для расчета формулу из рекомендации МСЭ (3). Это позволяет произвести предварительный расчет частотного диапазона и сравнительный анализ характеристик рассматриваемых георадаров.

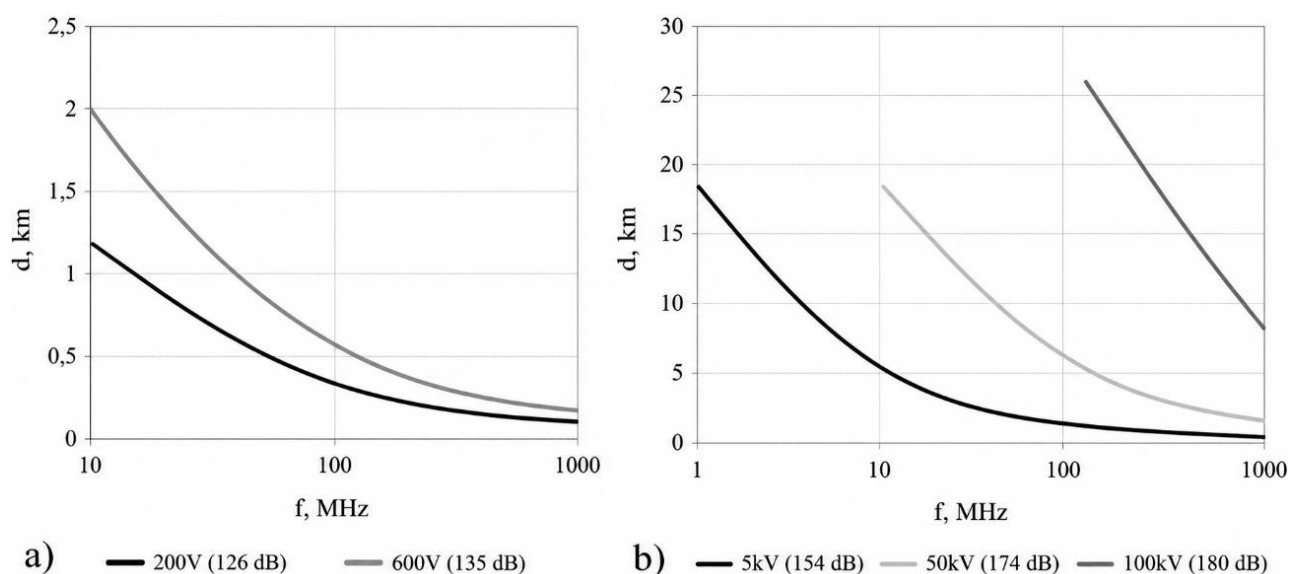


Рис. 2. Дальность радиолокации d георадаров в воздухе в зависимости от частоты f , а) МГР, б) ГГР.

Для расчета дальности радиолокации возьмем чувствительность приемника равной 100 мкВ, пиковую амплитуду СШП импульса, приложенного к входу излучающей антенны, от 200 В до 100 кВ, поперечное сечение радиолокационной цели – 1 м². Рассчитанные значения дальности радиолокации георадаров в воздухе в графическом виде приведены на рис. 2, для МГР – на рис. 2а, для ГГР – на рис. 2б. Численные значения приведены в таблице 1. Как видно из графиков и численных значений, дальность радиолокации МГР на частотах свыше 1000 МГц достигает 120-200 метров, дальность радиолокации ГГР, использующего более низкие частоты, достигает расстояний порядка 600 метров, что в принципе согласуется с расчетами, принятыми в радиолокации. При увеличении амплитуды излучаемого сигнала в n раз дальность радиолокации увеличивается на $\sqrt[n]{n}$, если амплитуда увеличилась с 600 до 5000 В, дальность возрастает с 200 до 600 метров. Более подробно это рассмотрено в работе, там же приведено частотное разделение МГР и ГГР [13].

Результаты, озвученные на конференциях и опубликованные в печати, показывают стабильную глубину зондирования до 150-200 м [11,14]. Часто заказчиками работ являются крупные ресурсодобывающие компании, которые не всегда дают разрешение на открытую публикацию результатов исследований [15]. Есть результаты георадиолокации до глубины 500 м и ниже,

полученные в районах Крайнего Севера в условиях вечной мерзлоты [16,17]. Ведутся дальнейшие теоретические и методологические работы по обработке конкретно этих и аналогичных им результатов глубинной георадиолокации [18,19]. Произведенные расчеты и практические результаты показывают зависимость глубины георадиолокации от уровня излучаемого СШП сигнала.

Таблица 1. Расчетная дальность радиолокации георадаров в воздухе, км.

U _{ант} , В (D, dB)	1 MHz	5 MHz	10 MHz	50 MHz	100 MHz	500 MHz	1000 MHz	1500 MHz	2000 MHz
200V (126 dB)	3,67	1,64	1,16	0,52	0,36	0,16	0,12	0,1	0,01
600V (135 dB)	6,1	2,8	1,95	0,87	0,61	0,28	0,2	0,16	0,11
5kV (154 dB)	18,4	8,23	5,82	2,6	1,8	0,82	0,58	0,47	0,41
50kV (174 dB)	58,2	26,1	18,4	8,23	5,82	2,6	1,84	1,5	1,3
100kV (180 dB)	260	116	82,2	36,7	26	11,6	8,2	2,12	1,84

2. Энергетические характеристики антенно-фидерных устройств ГГР

При георадиолокации в твердых средах дальность зондирования ниже по сравнению с дальностью в воздухе пропорционально главной характеристике исследуемой среды – поглощению. Другой важный параметр среды – диэлектрическая проницаемость ϵ – влияет на скорость распространения электромагнитной волны v . Ещё один параметр влияет на потери энергии в диэлектрических материалах – тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$. Известна зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от потенциала напряжения, используемого для измерений характеристик материалов, также есть частотная зависимость. Твердые исследуемые среды имеют характеристики полупроводящих материалов, некоторый уровень потерь энергии от значения $\operatorname{tg} \delta$ вполне допустим, данное направление требует отдельных лабораторных исследований. Например, в ряде работ приведены итоги исследований диэлектрической проницаемости как в полевых, так и в лабораторных условиях [20,21]. Зависимость характеристик антенн от толщины применяемого материала, результаты предварительных измерений будут приведены ниже.

Отметим, что в расчете дальности радиолокации применяем формулу (3), которая не учитывает характеристики антенно-фидерных устройств (АФУ). Естественно, классические воздушные радары, имеющие узкие рабочие полосы частот и АФУ с высоким коэффициентом усиления, показывают более высокие значения дальности радиолокации.

При реальном проектировании систем радиолокации (1) всё-таки нужно учитывать характеристики антенн, так как параметры узлов конкретны и значительны. К примеру, длина классической дипольной антенны равна половине длины волны, и усиление диполя составляет 2,15 dBi.

В подповерхностном радиозондировании прием сигнала на приемной антенне начинается в момент излучения передающей антенной. Антенны имеют отрицательное усиление, КПД резистивно-нагруженных дипольных антенн (РНДА) крайне мал и обычно составляет 10 % [22,23].

В целях уточнения характеристик разных типов антенн проведены измерения параметров дипольной антенны и РНДА, имеющих одинаковые геометрические размеры 500×34 мм. Диполи выполнены из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1 мм, РНДА состоит из двух вибраторов, общее сопротивление каждого вибратора составляет 1,1 кОм. Внешний вид обоих типов антенн приведен в работе [24]. Измерения ДН антенн производились на полуцилиндрическом измерительном стенде [25].

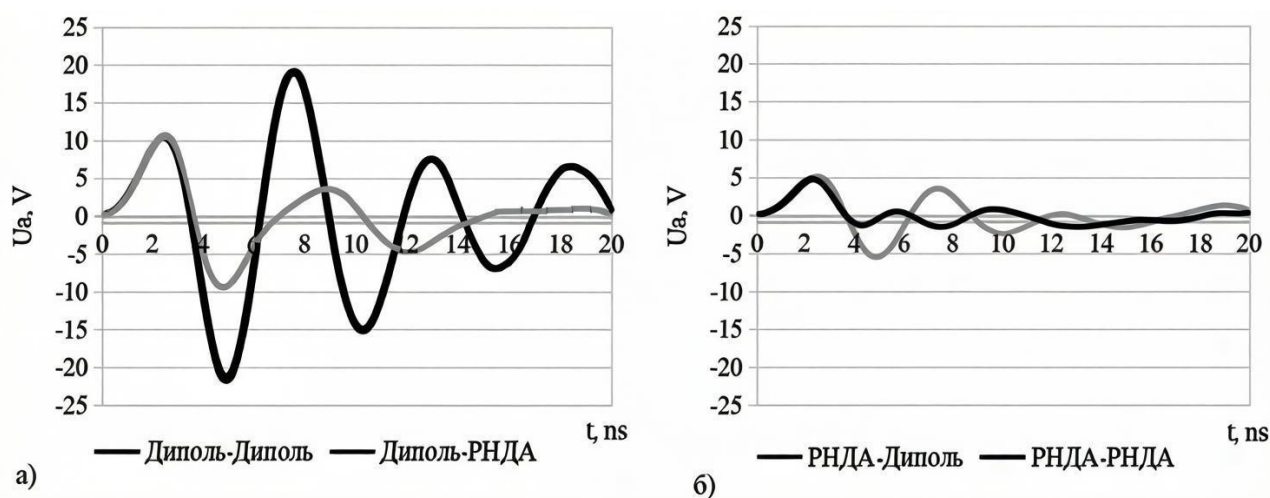


Рис. 3. Амплитуды принимаемых сигналов для различных комбинаций дипольных и резистивно-нагруженных дипольных антенн.

Использовался передатчик от георадара «Эхо-Сфера», предназначенный для георадарных измерений, имеющий длительность формируемого СШП импульса 4 нс и амплитуду 5,5 кВ [12]. На рис. 3 приведены амплитуды измеренных сигналов с приемной антенны, нагруженной на 50 Ом. На рис. 3а осциллограммой «Диполь-Диполь» наглядно продемонстрированы резонансные свойства дипольной антенны. Первый СШП импульс, полученный приемной антенной, имеет амплитуду 10 В, далее следуют паразитные автоколебания, начинающиеся резким увеличением амплитуды и последующим затуханием колебаний. При этом нужно учитывать, что паразитные автоколебания есть и у приемной антенны. На этом же рисунке на осциллограмме «Диполь-РНДА» видим начальные автоколебания от передающей антенны, а далее приемная антенна начинает принимать сигналы переотражения от стенок стенда.

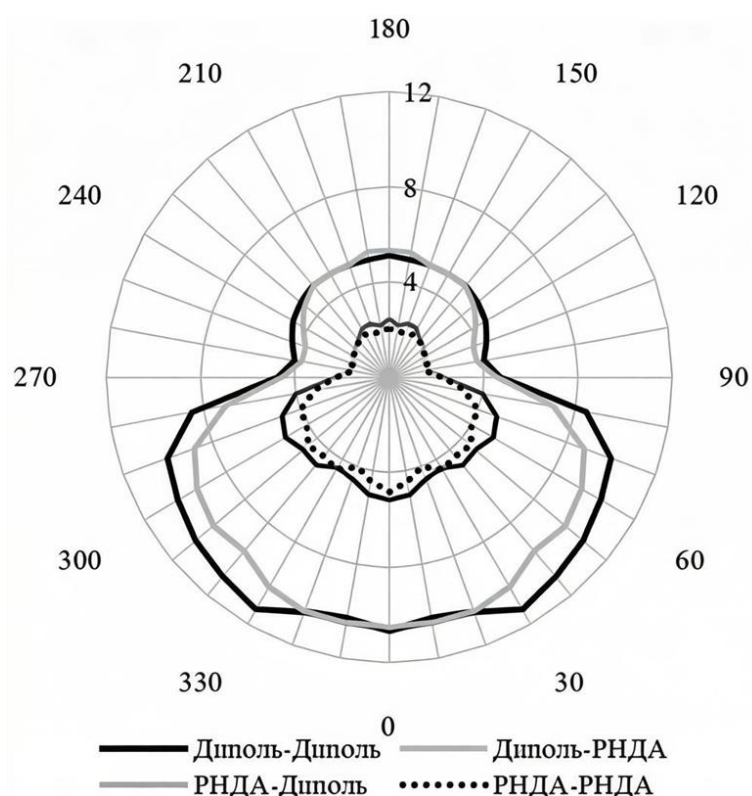


Рис. 4. Диаграммы направленности исследуемых антенн, амплитуды сигналов приемных антенн приведены в вольтах.

На рис. 3б приведены сигналы антенн «РНДА-Диполь», прием на дипольную антенну с возникновением автоколебаний с последующим затуханием. Классический СШП импульс получается при использовании

антенн «РНДА-РНДА»: на осциллограмме есть излученный дельтаобразный импульс от передатчика, далее следуют сигналы отражений от стенок стенда и окружающих посторонних объектов.

На рис. 4 приведены диаграммы направленности (распределение поля) исследуемых антенн в ближней зоне. Антенны, используемые в глубинной георадиолокации, при работе располагаются обычно параллельно друг от друга на расстоянии равной длине антенны, поэтому для них важно излучение сигнала не по центру ДН, а под углами $30-60^\circ$ от центра.

Если сравнивать амплитуды принимаемых сигналов РНДА по сравнению с дипольной антенной под $30-60^\circ$, то они ниже на величину от 0,8 до 1,2 дБ независимо от вида излучающих антенн (дипольной антенны, РНДА).

Произведем сравнение амплитуд «Диполь-Диполь» и «РНДА-Диполь», графики которых приведены на рис 3. Амплитуды первых дельтаобразных импульсов отличаются в 2,3 раза (7,1 дБ). Однако дипольная антенна обладает резонансными свойствами, поэтому второй и последующие импульсы на приеме имеют большую амплитуду; если сравнивать по амплитудам второго импульса, то они отличаются в 4,6 раза (13,5 дБ). При сравнении амплитуд «РНДА-Диполь» и «РНДА-РНДА» получаем отличие в 2,2 раза (6,9 дБ), по амплитудам вторых импульсов отличие в 4,2 раза (12,5 дБ).

Учитывая, что величины тока в приемной антенне значительно ниже, то и энергетические потери ниже, что и наблюдается по результатам измерения, при использовании резисторов в излучающей антенн амплитуда уменьшается в разы, а в приемной РНДА происходит снижение эффективности по сравнению с дипольной антенной на 8-15 %.

При расчете параметров антенны на основе полученных данных можем сделать следующий вывод: сравнение амплитуд первых дельтаобразных импульсов РНДА относительно дипольной антенны определяет КПД излучающей антенны в диапазоне 43-45 %, при сравнении вторых импульсов он равен 21-23 %. Ввиду того, что для георадиолокации используются две антенны, общий КПД

около 22-21 % по первым импульсам и 10-11 % по вторым импульсам, что, в принципе, совпадает с данными из публикаций [22,23].

3. Характеристики среды и материалов антенн, влияющие на дальность георадиолокации

Исследования в направлении повышения эффективности антенн имеют значимый приоритет. К примеру, у МГР есть ограничения по амплитуде излучаемого импульса, поэтому повышение эффективности антенн – это единственный способ увеличения дальности зондирования. Переход от термина «глубина георадиолокации» к термину «дальность георадиолокации» связан с расширением областей применения георадаров, например, для каротажа скважин или при проведении георадиолокационных работ в шахтах, где исследуют стены и кровлю шахты, формулировка «глубина зондирования кровли» некорректна [26-28].

Одним из способов повышения эффективности РНДА является снижение общего сопротивления вибраторов, однако, существуют пределы такого снижения из-за свойств исследуемой среды. У разных производителей стандартное сопротивление вибратора находится в пределах от 800 до 1500 Ом, но оно может быть снижено до 250 Ом. Практически выяснено, что при дальнейшем снижении сопротивления есть опасность возникновения паразитных автоколебаний [29]. При работе на водоемах можно использовать диполь без сопротивлений, высокая диэлектрическая проницаемость среды и погружение изолированных диполей в воду позволяют работать без возникновения паразитных автоколебаний.

Другим из реализованных способов повышения эффективности антенн является подключение нескольких вибраторов параллельно. Это дает повышение усиления многовибраторных антенн на 3 дБ при сохранении таких же геометрических размеров [30]. При практической разработке многовибраторной антенны были произведены эксперименты с антеннами длиной 0,5 метра с измерением характеристик на стенде с последующим масштабированием антенн до длины 3 и 6 метров.

Далее рассмотрим влияние характеристик используемых материалов на повышение эффективности РНДА при неизменных геометрических размерах. Из техники сверхвысоких частот (СВЧ) известно о влиянии тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$ на затухание сигналов при их распространении. Например, при работах с печатными платами из широко используемого стеклотекстолита FR-4 для повышения их эффективности используют специально разработанные материалы производства Rogers Corporation или аналогичные им с низкими значениями тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$. Материал имеет довольно высокую стоимость, поэтому для начальных экспериментов он не применялся. Использовался имеющийся в наличии стеклотекстолит толщиной 0,2 мм, 1 мм марки FR-4 со слоем меди 18 мкм и советский стеклотекстолит толщиной 2 мм со слоем меди 35 мкм.

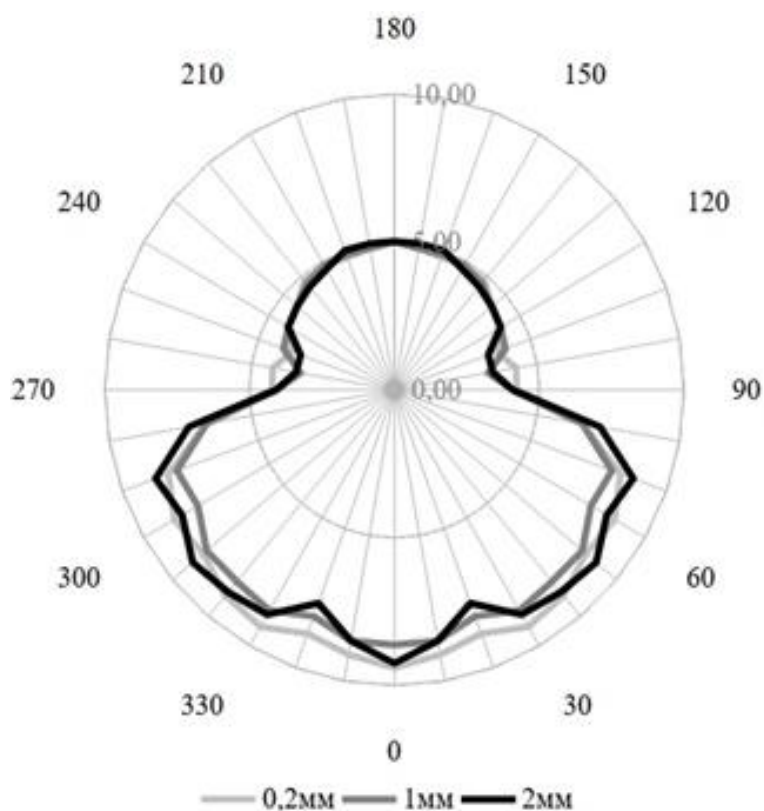


Рис. 5. Амплитуды принимаемого сигнала в зависимости от толщины материала, фольгированного вибраторов РНДА.

СШП импульс передатчика «Эхо-Сфера» имеет длительность 4 нс. Применение газонаполненного разрядника с водородом высокого давления позволило получить передний фронт СШП импульса около 1 нс, соответствующий

частоте 1 ГГц, что вызывает необходимость учитывать требования, необходимые при разработке СВЧ техники. На полуцилиндрическом стенде [25] были проведены измерения диаграммы направленности в ближней зоне, и проведен сравнительный анализ полученных численных результатов.

Предварительные измерения показали, что амплитуда сигнала, излученная антенной с материалом толщиной 0,2 мм выше амплитуды сигнала от антенны с толщиной 1 мм, амплитуда сигнала антенны с толщиной 2 мм имеет более неравномерную диаграмму направленности, для корректности в дальнейшем планируется провести дополнительные измерения после изготовления всех антенн из одинаковых материалов. Также предполагается провести экспериментальные работы по изучению влияния скин-эффектов проводников РНДА.

При измерениях характеристик дипольных антенн использовался одиночный СШП импульс с частотой повторения 20 Гц, при увеличении частоты повторения напряженность электромагнитного поля будет выше значительно выше, но при подаче периодического синусоидального напряжения амплитудой 5 кВ будет превышение установленных санитарно-биологических норм. Передатчик георадара «Эхо-Сфера» аналогичен передатчикам георадаров «Лоза» и «Грот», уровень излучения соответствует санитарно-биологическим нормам для безопасной работы обслуживающего персонала [31].

Заключение

Проведенные расчеты по рекомендациям МСЭ по дальности радиолокации в свободном пространстве и результаты экспериментальных работ показали теоретическую и практическую возможность дальнейшего увеличения дальности георадиолокации за счет повышения мощности излучаемого сигнала. Для повышения эффективности антенн при разработке необходимо учитывать характеристики используемых материалов для изготовления антенн. Разработка антенн длиной 0,5 м для возможности измерения их характеристик на стенде

с последующим масштабированием антенн до необходимых размеров для глубинной георадиолокации сокращает время и процесс разработки.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке грантом РНФ № 22-12-00083-П

Литература

1. Evans S. Radio techniques for the measurement of ice thickness //Polar Record. – 1963. – Т. 11. – №. 73. – С. 406-410.
2. Waite A.H., Schmidt S.J. Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow //Proceedings of the IRE. – 1962. – Т. 50. – №. 6. – С. 1515-1520.
3. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Под редакцией М.И. Финкельштейна. - М.: Недра, 1986. - 128 с.
4. Владов М.Л. Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию //М.: Изд-во МГУ. – 2004, 153 с.
5. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. - 240 с.
6. Расчет ослабления в свободном пространстве. // Рекомендация МСЭ-R P.525-3 (11/2016)
7. Георадарные системы // Geoscanners : [официальный сайт]. – URL: <http://www.geoscanners.com> (дата обращения: 15.08.2025).
8. Георадары и оборудование // Геотех : [официальный сайт]. – URL: <http://www.geotech.ru> (дата обращения: 15.08.2025).
9. Георадары и программное обеспечение // Логисис : [официальный сайт]. – URL: <http://www.logsys.ru/> (дата обращения: 15.08.2025).
10. Волкомирская Л.Б. и др. Современные георадары серии" ГРОТ" для экологического мониторинга //Экологические системы и приборы. – 2012. – №. 5. – С. 3-5.

11. Попов А.В. и др. Глубинный георадар: принципы и применение //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23. – №. 4. – С. 28-36.
12. Варенков В.В. и др. Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – №. 5. – С. 66-70. EDN: UJVGKQ
13. Аверин А.А. и др. Развитие глубинной георадиолокации //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2025. – Т. 30. – №. 3. – С. 62-75. EDN: LIVVSF
14. Беркут А.И., Морозов П.А., Попов А.В. Георадар для глубинных геологических исследований, основные направления применения //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – №. 5. – С. 89-96. – <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-14>. – EDN KOFCIS.
15. Антипов В.В., Горкин Д.С., Дуйсиналиев Н.А. Применение георадиолокации для геотехнического обследования объектов ООО «ГРК Быстринское» //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – №. 5. – С. 7-13. – <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-02>. – EDN FJJDRS.
16. Гулевич О.А. О глубинности в георадиолокации с учетом явления интерференции //Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 9. – С. 5-5. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.8>. – EDN SWIIUK.
17. Кильпио Е.Ю., Щербаков И.А. О научных результатах в области физических наук, полученных в 2020–2021 гг //Доклады РАН. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 506. – №. 2. – С. 3-33. – <https://doi.org/10.31857/S2686740022070069>. – EDN FPQSTX.
18. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Кайгородов Е.П. Опыт кинематической интерпретации данных глубинной георадиолокации //Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – №. 4. – С. 523-528. – <https://doi.org/10.15372/GIG2024162>. – EDN BKXXZZ.

19. Гулевич О.А. и др. Применение метода отраженных электромагнитных волн для изучения криогидрогеологических условий //Георесурсы. – 2025. – Т. 27. – №. 3. – С. 130-138. – <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.14>. – EDN HPLIRW.
20. Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях : дис. – Московский государственный университет им. МВ Ломоносова (МГУ). Геологический факультет, 2009. – С. 24-24. – EDN NLGABX.
21. Тарасова М.А., Бричёва С.С., Владов М.Л. Методические особенности полевого и лабораторного методов измерения диэлектрической проницаемости на примере песчано-глинистых отложений //Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2025. – №. 5. – С. 158-168. – <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-158-168>. – EDN EWCWPU.
22. Дудник А.В. Оценка достижимой глубины зондирования в георадиолокации //Наукоёмкие технологии. – 2009. – №. 9. – С.62-69
23. Daniels D.J. Surface-penetration radar: The Institution of Electrical Engineers //London, UK, J. – 1996. – Т. 996.
24. Сахтеров В.И. Характеристики резистивно-нагруженных антенн георадара в зависимости от формы диполя //Национальная ассоциация ученых. – 2020. – №. 62-1 (62). – С. 42-45. EDN: GNZWZD
25. Сахтеров В.И. Измерение характеристик антенн георадаров //Распространение радиоволн. – 2021. – С. 596-600. EDN: UVPVHN
26. Изюмов С.В., Круглов Н.А., Чернышев А.В. Применение георадаров серии" ТР-ГЕО" при производстве работ закрытым способом //Метро и тоннели. – 2007. – №. 1. – С. 17-19. EDN: UMRNGB
27. Бакин В.А. и др. Анализ обследований состояния горных выработок закрепленных анкерной крепью с применением георадара //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 10. – С. 172-178. EDN: UQFPZN

28. Сахтеров В.И., Прокопович И.В., Попов А.В. Экранированная дипольная антенна для задач радиолокационного каротажа //Радиотехника. – 2022. – Т. 86. – №. 8. – С. 103-112. EDN: LYXHNSV
29. Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Расчет резистивно-нагруженных дипольных антенн //Гелиогеофизические исследования. – 2025. – №. 48. – С. 104-111. EDN: BBUSIA
30. Аверин А.А. и др. Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – №. 3. – С. 49-58. EDN: VQOAIO
31. Пупатенко К.В., Нелюбов П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ радиочастотного диапазона ГЕОРАДАРА" ЛОЗА" //Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2019. – №. 7. – С. 78-83. EDN: DASWCO

Для цитирования:

Антипов В.В., Смирнов Д.А., Сахтеров В.И. Увеличение дальности подповерхностной радиолокации. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.13>