

Научная статья
УДК 621.3.091.22
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-09>

Результаты повышения выходной мощности передатчика георадара

Д.С. Горкин¹, В.И. Сахтеров²

^{1,2} Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, Россия)

² ООО «НПО Радиолокация в геофизике и радиофизике» (Москва, Россия)

¹ gorkin@izmiran.ru, ² sakhterov@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время существует несколько направлений для повышения дальности георадиолокации: первое – уменьшение центральной частоты зондирующего импульса, что ведет к увеличению длины антенн до сотни метров, второе – повышение выходной мощности передатчика. Кроме того, возможно повышение эффективности антенно-фидерных устройств и применение математических методов обработки, например, накопление принимаемого сигнала. При увеличении длины антенн дальность зондирования повышается, но при этом уменьшается пространственное разрешение и, следовательно, теряется информативность о строении исследуемой среды. При повышении выходной мощности передатчика георадара при фиксированной длине антенн дальность зондирования также повышается, однако не снижается пространственное разрешение.

Цель. Разработать способ увеличения выходной мощности передатчика георадара, используя для этого оригинальные решения, позволяющие применять электронные компоненты с более низкой стоимостью.

Результаты. Разработан и запатентован способ увеличения выходной мощности передатчика георадара, применяемый в передатчиках глубинных георадаров повышенной мощности. Показано, что использование найденного решения повышает уровень сервисных качеств георадиолокации для пользователей, поскольку имеется возможность устанавливать необходимую мощность излучения под конкретное исследование.

Практическая значимость. Данный способ уже сегодня применяется для глубинной радиолокации импульсными георадарами повышенной мощности с резистивно-нагруженными дипольными антеннами, что позволяет достигать глубин зондирования до 200 м, а в отдельных случаях – до 500 м.

Ключевые слова

Георадар, резистивно-нагруженная дипольная антенна, глубинная георадиолокация, газонаполненные разрядники

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00083-П.

Для цитирования

Горкин Д.С., Сахтеров В.И. Результаты повышения выходной мощности передатчика георадара // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-09>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В настоящее время для глубинной радиолокации широко применяются импульсные георадары повышенной мощности с резистивно-нагруженными дипольными антеннами, что в комплексе позволяет достичь глубины зондирования до 200–300 м, а в отдельных случаях – до 500 м [1, 2]. Направлений для повышения дальности георадиолокации несколько. Первое – уменьшение центральной частоты зондирующего импульса, что ведет к увеличению длины антенн до сотни метров, второе – повышение выходной мощности передатчика. Также возможно увеличение дальности георадиолокации через повышение эффективности антенно-фидерных устройств [3]. Математические методы обработки принимаемых сигналов в данной работе не рассматриваются.

При увеличении длины антенн глубина зондирования повышается, но при этом уменьшается пространственное разрешение и, следовательно, теряется информативность о строении исследуемой среды [2]. При повышении выходной мощности передатчика георадара при фиксированной длине антенн глубинность зондирования также повышается, но разрешение не снижается.

В ряде работ предполагается физическое ограничение глубин зондирования при дальнейшем повышении мощности сверхширокополосного (СШП) импульса. Однако эти выводы сделаны исходя из

работ с применением классических малоглубинных георадаров на основе осциллографов со стробоскопическим эффектом [4, 5]. Данный класс георадаров имеет ограничение по амплитуде формируемого видеоимпульса не выше 600 В, и в настоящей работе они не рассматриваются [6, 7]. Ограничения по амплитуде наложены из-за высокой частоты повторения излучаемого СШП-импульса (до 100 кГц), что связано с регламентируемыми медико-биологическими требованиями.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать способ увеличения выходной мощности передатчика георадара, используя для этого оригинальные решения, позволяющие применять электронные компоненты с более низкой стоимостью.

Материалы и методы

Широко распространенные глубинные георадары «Грот» и «Лоза» в стандартной комплектации поставляются с передатчиком, в котором амплитуда видеоимпульса, прикладываемого к вибраторам антенн, составляет 5–5,5 кВ [1, 8]. Такие значения амплитуды обусловлены медико-биологическими требованиями по ограничению энергетического воздействия электромагнитного излучения на операторов георадаров [9].

В георадаре «Лоза» реализована схема регистрации данных методом последовательного измерения на компараторе. Для получения данных в волновой форме передатчик георадара излучает видеоимпульсы с частотой повторения 250 Гц, время регистрации одного кадра составляет 0,5 с. При работе с записью сигналов в бинарной форме время регистрации 2 мкс, здесь возможно снижение ограничений по амплитуде излучаемого видеоимпульса, поэтому применяются передатчики с амплитудами видеоимпульса до 21 кВ.

В георадарах марки «Грот» применена схема регистрации получаемых данных с использованием аналого-цифровых преобразователей (АЦП), что сокращает время регистрации до 2 мкс, а ограничения по частоте зондирования в 10 Гц связаны с низкой скоростью передачи данных с приемника в регистратор, вследствие этого частота повторений излучаемого видеоимпульса составляет около 50 Гц. В режиме глубинной радиолокации частота излучения видеоимпульса снижается вплоть до единиц герца. Все это в комплексе позволяет георадарам с регистрацией данных с помощью АЦП использовать видеоимпульсы с амплитудами до 100 кВ без превышения норм воздействия электромагнитного поля на операторов георадара [8].

Для формирования высоковольтных видеоимпульсов используются различные газонаполненные разрядники с напряжениями пробоя от 5 кВ и выше. Ассортимент элементов защиты и коммутации, выпускаемый промышленностью, гораздо шире. В радиосвязи, к примеру, для защиты входных цепей используются разрядники напряжения менее 100 В [10]. В георадиолокации же используются коммутирующие неуправляемые разрядники РК-164 с динамическим напряжением пробоя 5–5,5 кВ, а также ряд других на более высокое напряжение пробоя [11]. Самое простое техническое решение для повышения мощности – использование разрядников на более высокое напряжение пробоя, в этом случае одной из проблем является использование высоких напряжений со всеми вопросами по электроизоляционным мероприятиям.

Немаловажное значение имеет стоимость приобретаемых приборов, разрядники с напряжением пробоя 45 кВ стоят свыше 100 000 рублей. Для повышения выходной мощности и снижения стоимости комплектации было предложено последовательное включение более дешевых газонаполненных разрядников с низким напряжением пробоя [12].

В схеме генератора с симметричным выходом, приведенной на рис. 1,а, к вибраторам диполя напряжение прикладывается в момент формирования дельтообразного импульса. Переменное напряжение с генератора V повышается с помощью трансформатора T и выпрямляется диодами $D+$ $D-$ с использованием схемы удвоения Латура. Резисторы Rd предназначены для ограничения тока через диоды, в зависимости от используемых компонентов могут не применяться. Происходит заряд накопительных конденсаторов C , и при достижении напряжения пробоя разрядники FV соединяют конденсаторы в единую разрядную цепь с резисторами R . Ток разряда, протекая по данной цепи, образует дельтообразные импульсы на резисторах относительно общей точки. Видеоимпульсы далее поступают в антенну и излучаются в среду.

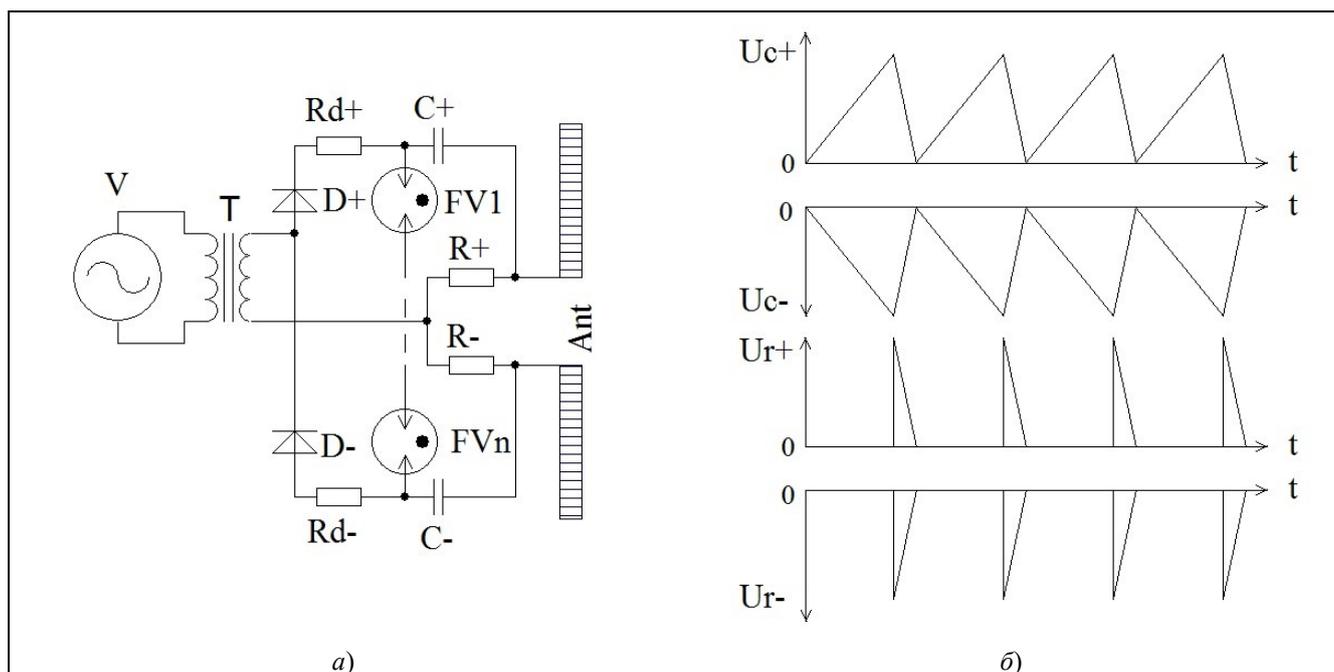


Рис. 1. Схема генератора с симметричным выходом (а) и эпюры напряжений на элементах схемы (б)

Fig. 1. Generator circuit with symmetrical output (a) and voltage diagrams on circuit elements (b)

Процессы на элементах схемы приведены на рис. 1,б. В данной схеме возможно последовательное подключение газонаполненных разрядников. При расчете пиковой мощности необходимо учитывать последовательное включение накопительных конденсаторов. Применение симметричной схемы генерации, с одной стороны, приводит к удвоению количества используемых компонентов, с другой – используются компоненты с более низким рабочим напряжением, что может привести к удешевлению стоимости генератора. Расчетная формула длительности импульса, формируемого данной схемой, записывается следующим образом:

$$\tau_i = R \cdot C, \tag{1}$$

где τ_i – длительность импульса, с; R – сопротивление разрядной цепи, Ом; C – емкость накопительного конденсатора, Ф.

Здесь, по сути, использована схема искрового передатчика Герца с ударным возбуждением дипольной антенны, излучаемый спектр электромагнитной волны (ЭМВ) будет формироваться геометрическими параметрами антенны. Как показывает практика, сформированный генератором СШП-импульс может растягиваться во времени в несколько раз, т.е. на формирование конечной длины импульса влияет напрямую длина антенны и ее частотные характеристики. В данном случае передатчик, антенна и исследуемая среда работают как замкнутая система.

Как известно, в импульсном радиолокаторе к передатчику подключена антенна, которая преобразует СШП-импульс в ЭМВ, где максимум амплитуды в формируемом спектре соответствует резонансной частоте антенны. При этом ширина полосы антенной системы больше длительности импульса τ_i . Однако при уменьшении τ_i они становятся приблизительно равны, в результате чего характеристики ЭМВ определяются частотной характеристикой передающей антенны. Надобность в заполнении видеоимпульса радиочастотой вообще отпадает, достаточно воздействовать на антенну видеоимпульсом длительностью, равной половине длины антенны, или перепадом напряжения с фронтом, соответствующим половине длины антенны. Такой метод предложен Дж. Куком и используется в рупорных и вибраторных дипольных антеннах [13].

Рассмотренный способ позволяет повысить рабочее напряжение кратно количеству разрядников. Например, при последовательном включении четырех разрядников Ру-62 можно достичь рабочего напряжения свыше 60 кВ [2].

Результаты и их обсуждение

В результате проведения экспериментов выявлена необходимость учитывать процесс последовательного возникновения общего разряда. Получается несколько последовательно включенных конденсаторов, на которых при заряде растет напряжение пропорционально количеству включенных разрядников с учетом емкости разрядников. Далее происходит пробой разрядника с наименьшим напряжением, но ток по общей цепи еще не протекает, задержка возникновения общего пробоя между разрядниками может достигать 1–2 нс от пробоя первого разрядника.

На рис. 2 приведены графики сигналов с приемной антенны после прохождения от передатчика через слой влажного песка толщиной 60 см [14]. При измерениях использовалась схема генератора, приведенная на рис. 1, с одним разрядником 5 кВ и с двумя последовательно включенными разрядниками по 5 кВ. Как видно, у одинарного разрядника сплошной фронт нарастания сигнала. Возникновение последовательного пробоя для двух последовательно включенных разрядников на суммарное напряжение 10 кВ имеет более сложный характер. Вначале пробивается один разрядник, у сигнала на 10 кВ это отображено возникновением небольшого отрезка синусоиды малой амплитуды, поскольку нет полного протекания тока по схеме, то есть небольшой ток через паразитную емкость второго разрядника. Далее через единицы наносекунд происходит пробой второго разрядника, и по схеме протекает полный ток, формируя дельтообразный импульс, превышающий амплитуду разрядника на 5 кВ. Можно заметить, что амплитуда дельтообразного импульса не превышает амплитуду импульса разрядника в 2 раза, ориентировочно в 1,42 раза.

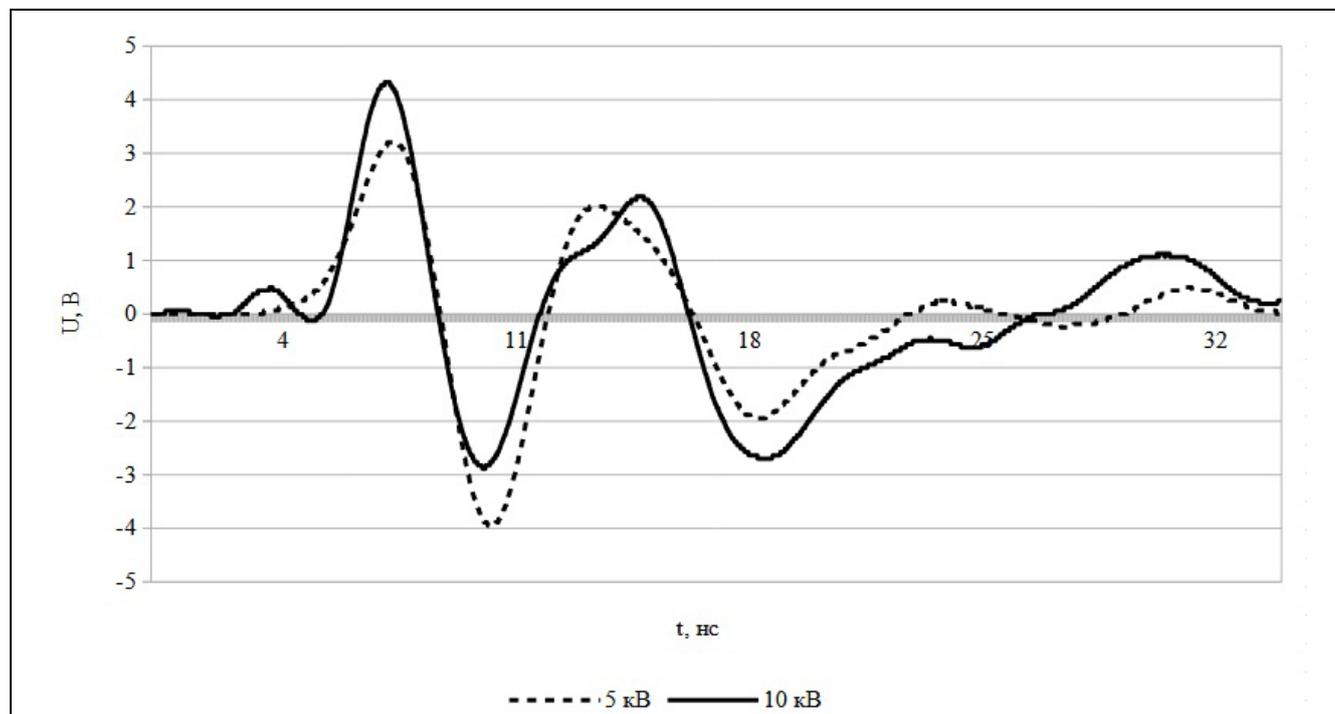


Рис. 2. Графическое представление сигналов с приемной антенны с отображением пробоя одного и двух последовательно включенных разрядников

Fig. 2. Graphs of signals from the receiving antenna showing the breakdown of one and two series-connected arresters

При использовании трех и более разрядников величина тока через паразитные емкости по мере пробоя разрядников вырастает, но амплитуда предварительных пробоев по отношению к максимальному импульсу остается примерно той же. Данные результаты приведены для измерений с использованием лабораторного источника постоянного напряжения. Однако нужно учитывать свойства разрядника и изменение порога динамического напряжения пробоя от dU/dt , т.е. уровень напряжения пробоя зависит от скорости нарастания напряжения. Амплитуда формируемого видеопульса может несколько отличаться, что связано со свойствами разрядника, для различных скоростей нарастания напряжения на накопительном конденсаторе уровень динамического напряжения пробоя имеет различные значения. Мини-

мальное значение напряжения пробоя будет при постоянном напряжении, чем выше скорость нарастания напряжения, тем выше порог пробоя. Пределы изменения динамического напряжения пробоя приведены в параметрах конкретного прибора [12]. Также на длительность СШП-импульса влияет уровень напряжения, при котором происходит прерывание тока через разрядник (не на нулевом уровне).

Рассмотрим зависимость глубины зондирования от амплитуды генератора. Для формирования видеоимпульса использовались газонаполненные разрядники на напряжение пробоя 5 кВ, 16 кВ и два на 16 кВ, включенных последовательно – 32 кВ. Остальные компоненты цепей, формирующих дельтообразный видеоимпульс, использовались одни и те же, так же как и резистивно-нагруженные дипольные антенны длиной 0,5 м.

Измерения проводились двумя способами:

1) на просвет на полуцилиндрическом стенде фиксировались параметры первого излученного видеоимпульса, прошедшего через слой песка, его амплитуда и ширина [14]. Результаты этих измерений для напряжений 5 и 10 кВ использовались выше, и данные приведены в графическом виде на рис. 2;

2) проводилась георадарная съемка, произведено сравнение амплитуд сигналов передатчика и принятых сигналов при отражении от границы сред (рис. 3).

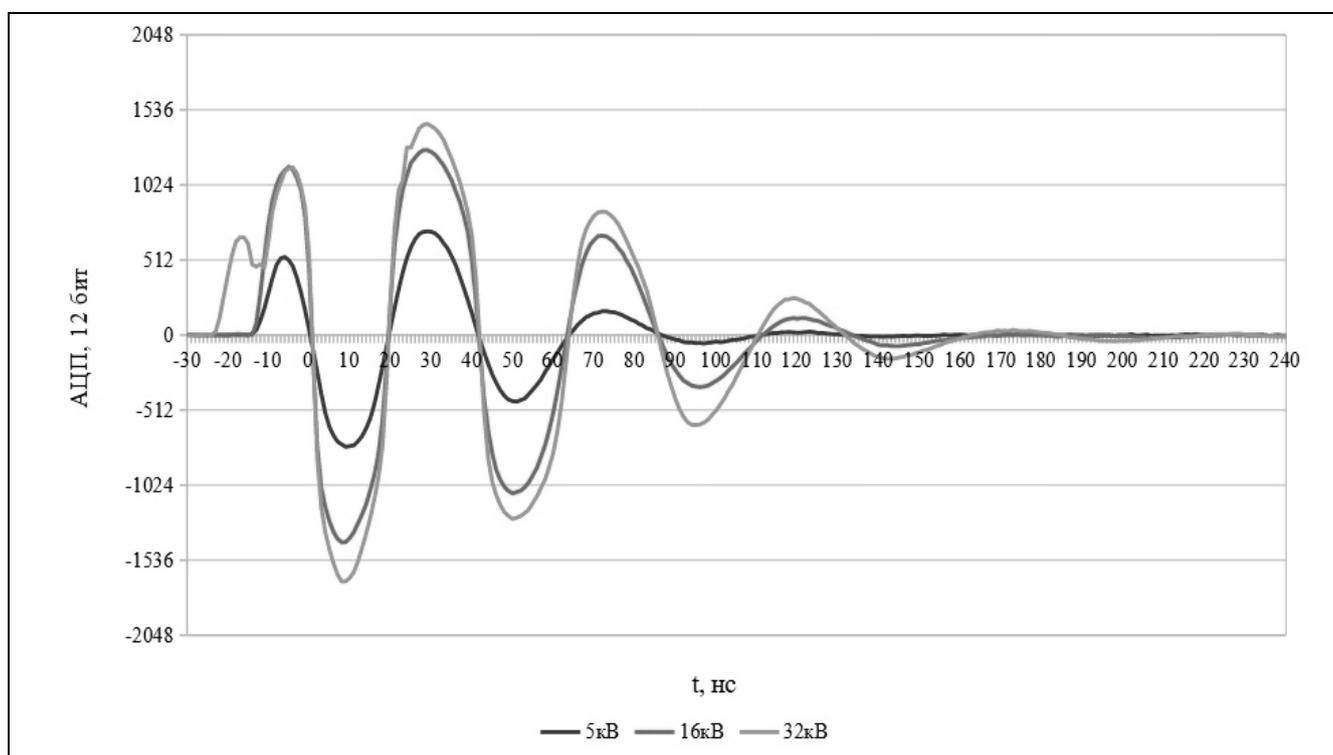


Рис. 3. Графики зависимости уровня приемного сигнала от амплитуды излученного сигнала

Fig. 3. The level of the receiving signal as a function of the amplitude of the emitted signal

Кроме того, подобрано ослабление входного сигнала для показа полной волновой формы принимаемых сигналов, в этом случае подробно можно рассмотреть сигналы, отраженные от верхних слоев изучаемой среды. Измерения производились в одной точке, параметры элементов генератора не изменялись, амплитуда излучаемого сигнала менялась заменой разрядника на соответствующее напряжение. Антенны использовались одни и те же, длиной 3 м. Для наглядности синхронизация всех сигналов произведена по заднему фронту зондирующего импульса, полученного наземной волной, в зависимости от использованного разрядника длительность импульса наземной волны имеет разные длительности. Это связано с процессами образования дельтообразного импульса, а также комбинированным прохождением сигнала по воздуху с учетом коэффициента укорочения, возникающего при прохождении сигнала над твердой средой.

Амплитудные искажения более мощных импульсов до временной отметки 90 нс связаны с входными трактами приемника, в зависимости от амплитуды принятого сигнала время их восстановления отлич-

чается. Как видно, остальные отраженные сигналы имеют одинаковую длительность. По мере принятия отраженных сигналов, имеющих более длинный путь распространения, меняется их амплитуда с тенденцией к снижению. Амплитуда от 5 кВ передатчика восстанавливается раньше всех, но и теряет амплитуду ранее всех. Амплитуда же сигнала от передатчика 32 кВ вначале ограничена, но по мере выхода из ограничения наблюдается двукратное превосходство над сигналом от передатчика 16 кВ, в районе 95 нс. При дальнейшем распространении сигнала около 120 нс сохраняется такое же соотношение амплитуд. Сигнал от 5 кВ передатчика к этому моменту практически полностью ослаблен.

Рассмотрим сигналы приемника при использовании антенн длиной 3 м (50 МГц) и передатчика с амплитудой СШП-импульса 32 кВ при различных ослаблениях, полученных от более глубоких слоев изучаемого грунта и позволяющих наблюдать подробно сигналы верхней и средней частей разреза. Сигналы приведены на рис. 4. Изменяя ослабление аттенюаторов приемника, можно более подробно рассмотреть необходимую глубину [15]. Таким образом, при ослаблении аттенюатора 36 дБ сигнал полностью затухает на отметке 250 нс, что при диэлектрической проницаемости среды $\epsilon = 9$ соответствует глубине 12 м. При ослаблении 18 дБ сигнал затухает на 475 нс, что соответствует глубине 23 м, при ослаблении 0 дБ сигнал затухает на 700 нс, что соответствует глубине 35 м.

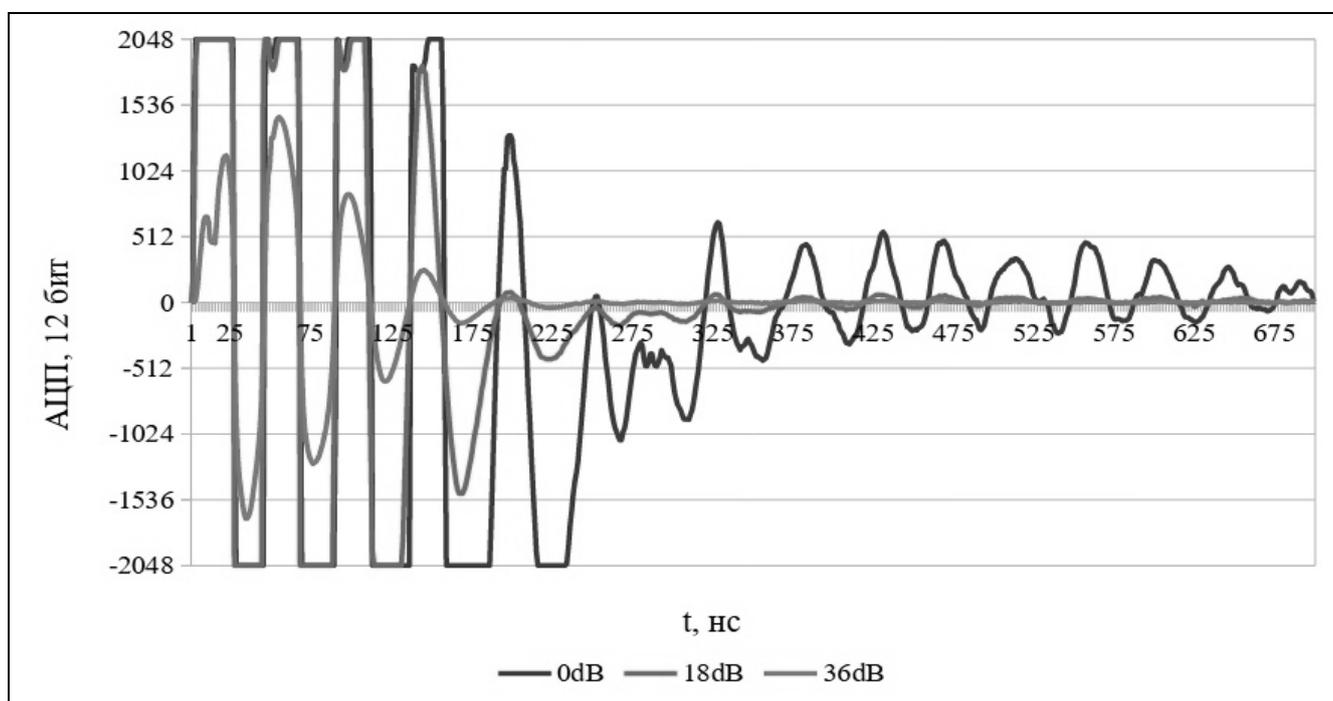


Рис. 4. Графическое представление амплитуд сигналов при различных ослаблениях

Fig. 4. Signal amplitudes at various attenuations

В схеме (см. рис. 1), где максимальное напряжение, приложенное к антенне, равно напряжению накопительного конденсатора в момент пробоя разрядника, важен вопрос уровня выходной мощности для сравнения образцов аппаратуры с разными комплектующими. При этом нужно учитывать взаимодействие аппаратуры с антенной, которая зависит от конструктивного исполнения, длины вибраторов, их ширины. Также от физических размеров зависит емкостная связь с изучаемой средой. Все эти влияния приводят к изменению параметров формируемого дельтообразного импульса. Для упрощения при сравнениях различных устройств будем использовать значение пиковой мощности разрядного резистора. В схеме при напряжении на конденсаторе C 5,5 кВ и номинале разрядного резистора $R = 150$ Ом ток, протекающий через резистор, около 36 А, а пиковая выходная мощность будет порядка 200 кВт.

Использование передатчика на основе схемы, приведенной на рис. 1, с четырьмя последовательно включенными разрядниками, позволило получить СШП-импульс амплитудой выше 60 кВ. При использовании антенн длиной 50 м удалось зафиксировать отражения от слоев с глубины около 500 м [2, 16].

Заключение

Увеличение амплитуды излученного сигнала в импульсных георадарах приводит к увеличению глубины зондирования. Для подмосковных глинистых почв двукратное увеличение амплитуды хоть и не способствует двукратному увеличению глубины, но позволяет производить георадиолокацию до глубин 20–30 м при использовании антенн длиной 3 м с достаточно высоким разрешением и до глубин 150–200 м при использовании более длинных антенн с небольшим ухудшением пространственного разрешения.

Список источников

1. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6.
3. Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 3. С. 49–58. DOI 10.18127/j15604128-202403-06.
4. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений: Учеб. пособие. М.: ГЕОС. 2017. 240 с.
5. Дудник А.В. Методы оптимизации энергетического потенциала радиотехнических приборов подповерхностного зондирования: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИРЭА. 2010. 18 с.
6. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.geotech.ru/images/georadary/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf?ysclid=mb9d8uih9g928069490, дата обращения 12.03.2025.
7. Geoscanners АВ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.geoscanners.com/>, дата обращения 12.03.2025.
8. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
9. Пупатенко К.В., Нелюбов П.А. Исследование электромагнитного излучения радиочастотного диапазона георадара «Лоза» // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С. 78–83.
10. Черепанов В.П., Хрулев А.К., Блудов И.П. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок: Справочник. М.: Радио и связь. 1994. 224 с.
11. Плазма. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://plasmalabs.ru/>, дата обращения 12.03.2025.
12. Патент на полезную модель RU218691 от 06.06.2023. Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности / Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И.
13. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра. 1986. 128 с.
14. Сахтеров В.И. Измерение характеристик антенн георадаров // Труды XXVII Всероссийской открытой науч. конф. «Распространение радиоволн». Калининград: Балтийский федеральный университет им. И. Канта. 2021. С. 596–600.
15. Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10.
16. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Долгих Ю.Н., Кайгородов Е.П., Санин С.С., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Опыт исследования криолитозоны методом отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) на глубину свыше 500 метров // Сборник тезисов науч.-практич. конф. «Электроразведка 2021». М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2021. С. 82–88.

Информация об авторах

Дмитрий Сергеевич Горкин – науч. сотрудник

SPIN-код: 5641-7300

Владимир Иванович Сахтеров – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 7559-8325

Статья поступила в редакцию 17.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

The results of increasing the output power of the georadar transmitter

D.S. Gorkin¹, V.I. Sakhterov²

^{1,2} Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Moscow, Russia)

² LLC "RL Radar in geophysics and radiophysics" (Moscow, Russia)

¹ gorkin@izmiran.ru, ² sakhterov@mail.ru

Abstract

There are several ways to increase the distance of ground penetrating radar sounding. The first way is to decrease the central frequency of the probing pulse, which will increase the antenna length to hundreds of meters. The second way is to increase the transmitter output power. In addition, it is possible to improve the efficiency of antenna-feeder devices and use mathematical processing methods, for example, with signal accumulation by multiple shooting. With an increase in the antenna length, the probing range increases, but at the same time the spatial resolution decreases and, therefore, the information about the structure of the studied environment is lost. With an increase in the output power of the ground penetrating radar transmitter with a fixed antenna length, the probing range also increases, but the spatial resolution does not decrease. A method for increasing the output power of the ground penetrating radar transmitter has been developed and patented. This method is used in high-power transmitters for deep ground penetrating radar. The use of the found solution increases the level of service qualities of ground penetrating radar for users, since it is possible to set the required radiation power for a specific study. Currently, this method is already being used for deep-sea radiolocation using high-power pulsed georadars with resistively loaded dipole antennas, which has made it possible to achieve probing depths of up to 200 m, and in some cases, up to 500 m.

Keywords

Georadar, resistively loaded dipole antenna, deep georadiolocation, gas-filled arresters

For citation

Gorkin D.S., Sakhterov V.I. The results of increasing the output power of the georadar transmitter. 2025. V. 30. № 3. P. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-09> (in Russian)

References

1. *Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemsky D.E., Morozov P.A., Berkut A.I.* Deep penetration subsurface radar: principles and application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2018. V. 23. № 4. P. 28–36. (in Russian)
2. *Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Lyakhov G.A., Reznikov A.E.* Deep georadiolocation. *Journal of Radio Electronics*. 2019. № 4. P. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6. (in Russian)
3. *Averin A.A., Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I.* Increasing the probing depth of pulsed GPR by reducing the antenna impedance. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 3. P. 49–58. DOI 10.18127/j15604128-202403-06. (in Russian)
4. *Vladov M.L., Sudakova M.S.* Georadiolocation: from the physical foundations to promising areas: textbook. M.: GEOS. 2017. 240 p. (in Russian)
5. *Dudnik A.V.* Methods of optimizing the energy potential of radio engineering subsurface sounding devices: abstract. diss. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Moscow: MIREA. 2010. 18 p. (in Russian)
6. Radio engineering instrument of subsurface sounding (georadar) "OKO-3". Universal basic kit. Technical description. User manual. [Electronic resource] – Access mode: https://www.geotech.ru/images/geographic/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf?ysclid=mb9d8uih9g928069490, date of reference 12.03.2025. (in Russian)
7. Geoscanners AB. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.geoscanners.com/>, date of reference 12.03.2025.
8. *Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Sakhterov V.I.* Modern GPR "Grot" series for environmental monitoring. *Ecological systems and devices*. 2012. № 5. P. 3–5. (in Russian)
9. *Pupatenko K.V., Nelyubov P.A.* Investigation of electromagnetic radiation of the GPR "Loza" in the radio frequency band. Designing the development of the regional railway network. 2019. № 7. P. 78–83. (in Russian)
10. *Cherepanov V.P., Khrulev A.K., Bludov I.P.* Electronic devices for protection of REA from electrical overloads: Handbook. Moscow: Radio and Communications. 1994. 224 p. (in Russian)
11. Utility model patent RUS218691 dated 06.06.20234. Georadar for radar sensing of the underlying surface. *Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I.* (in Russian)
12. Plasma. [Electronic resource] – Access mode: <https://plasmalabs.ru/>, date of reference 12.03.2025. (in Russian)
13. *Finkelstein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P.* Application of radar subsurface sounding in engineering geology. Moscow: Nedra. 1986. 128 p. (in Russian)
14. *Sakhterov V.I.* Measuring characteristics of GPR antennas. Proceedings of the XXVII All-Russian Open Scientific Conference. "Propagation of radio waves". Kaliningrad: I. Kant Baltic Federal University. 2021. P. 596–600. (in Russian)
15. *Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov A.D., Sahterova T.V., Sahterov V.I.* The results of experiments with the GPR «Sphere». *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10. (in Russian)
16. *Gulevich O.A., Volkomirskaya L.B., Dolgikh Yu.N., Kaigorodov E.P., Sanin S.S., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V.* The experience of studying the cryolithozone by reflected electromagnetic waves (MOEMW) to a depth of more than

500 meters. Collection of scientific abstracts-practical conference "Electrical Exploration 2021". Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences. 2021. P. 82–88. (in Russian)

Information about the authors

Dmitry S. Gorkin – Research Scientist

Vladimir I. Sakhterov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 17.04.2025

Approved after reviewing 26.05.2025

Accepted for publication 02.06.2025

ЖУРНАЛ «СИСТЕМЫ ВЫСОКОЙ ДОСТУПНОСТИ»

Главный редактор: док. техн. наук, член-корреспондент Академии криптографии Владимир Игоревич Будзко

Международный научно-технический журнал, освещающий проблемы обеспечения конфиденциальности, доступности и целостности для класса информационно-телекоммуникационных систем высокой доступности, которые составляют неотъемлемую часть технологий функционирования критических для страны направлений деятельности, например, диспетчеризация транспорта, управление перераспределениями электрических мощностей в масштабах региона, осуществление электронных платежей в реальном масштабе времени.

Включен в Перечень ВАК

Журнал издается под научно-методическим руководством Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН
Издаётся с 2006 г.

ISSN 2072-9472

Периодичность - 4 номера в год

«Пресса России» - индекс 36934

Научные специальности ВАК

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
- 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы



Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru