

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.18>

УДК: 621.396.945; 621.3.091.22

## АНТЕННА ИМПУЛЬСНОГО ГЕОРАДАРА

В.И. Сахтеров

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
имени Н.В. Пушкова РАН,  
108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское ш. 4

Статья поступила в редакцию 10 августа 2023 г.

**Аннотация.** В георадиолокации подповерхностных слоев грунта широко используются резистивно-нагруженные диполи различных длин под различные частотные диапазоны. При этом в большинстве случаев используется передатчик с фиксированной длиной электромагнитного сверхширокополосного (СШП) импульса, что не всегда позволяет использовать полностью характеристики антенны. Рассматриваются направленные антенны для георадаров повышенной мощности с амплитудами зондирующего сигнала 5 кВ/м и выше. Предложен способ согласования направленной резистивно-нагруженной антенны с передатчиком, реализованным с использованием газонаполненного разрядника. В новой конструкции времязадающие и коммутирующие элементы перенесены из передатчика в состав антенны, при этом резисторы резистивно-нагруженного вибраторов диполя включены в состав генератора, формирующего импульс. Соотношение элементов генератора позволяет согласовывать длину антенны с длительностью импульса и производить более эффективное излучение электромагнитной волны. Кроме этого, новая конструкция антенны позволяет подобрать необходимое распределение поля – либо выделить максимум поля, либо максимально увеличить боковые излучение. Использование металлического экрана снижает величину электромагнитного излучения на оператора георадара, вследствие чего можно повысить излучаемую мощность классических георадаров. Результатом изложенных преобразований является повышение динамического диапазона георадара.

**Ключевые слова:** георадар, подповерхностное зондирование, передатчик, антенна подземного излучения.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00083).

**Автор для переписки:** Сахтеров Владимир Иванович, [sahterov@izmiran.ru](mailto:sahterov@izmiran.ru)

## **Введение**

В настоящее время для исследования подповерхностных слоев земли широко используются георадары, зондирующие исследуемую среду сверхкороткими электромагнитными импульсами. Отметим, что данная область применения антенн накладывает свои ограничения на характеристики антенн, и на некоторое несоответствие терминологии классических антенн. Связано это с тем, что рабочая зона расположена в зоне формирования диаграммы направленности антенны, примерно 5-6 длин антенны. При этом эксперименты, проведенные на песчанике в практически идеальных условиях, подтверждают формирование классической диаграммы направленности антенны на расстоянии 10 длин антенн. Сотрудниками ИЗМИРАН получены значительные результаты георадиолокации – отраженные сигналы зондирующих импульсов с глубины нескольких сотен метров, что подтверждено данными каротажа скважин [1, 2]. Также ведутся эксперименты по георадиолокации подповерхностных слоев земли с летательных аппаратов [3, 4]. В рамках изыскательских работ по гранту [5] проводились теоретические расчеты и практические эксперименты по исследованию характеристик антенн на различных измерительных стендах [6]. Была разработана направленная антенна подземного излучения, на которую получен патент на изобретение [7], более подробно разработка описана в отдельной статье [8]. Проводятся дальнейшие эксперименты по скважинному каротажу с использованием этой антенны. Полученные результаты представлены на нескольких научных конференциях соответствующей тематики. В продолжение работ на основе полученного патента были изготовлены макеты экранированных антенн для подповерхностного

зондирования. Целью экспериментов было уменьшение основной воздушной помехи, возникающей от излучения формируемого распределения поля в заднюю полусферу, что и было достигнуто: уровень амплитуды излучения распределенного поля в задней полусфере снижен с 30% до 18% относительно главного максимума распределенного поля. В процессе исследований была реализована возникшая идея согласования антенны с резистивно-нагруженными диполями с передатчиком.

### Описание согласования антенны с передатчиком

В георадиолокации передатчик и приемник располагаются на близком расстоянии относительно друг друга. В классических георадарах максимальное значение напряжения импульса не превышает 600 В, используются антенны типа «Бабочка» или им подобные с максимальным усилением [9, 10]. В импульсных георадарах с выходной амплитудой излучаемого импульса 5 кВ/м и выше [11, 12] применяются антенны с резистивно-нагруженными диполями [13], которые обеспечивают излучение сверхкороткого видеоимпульса без последующих паразитных колебаний.

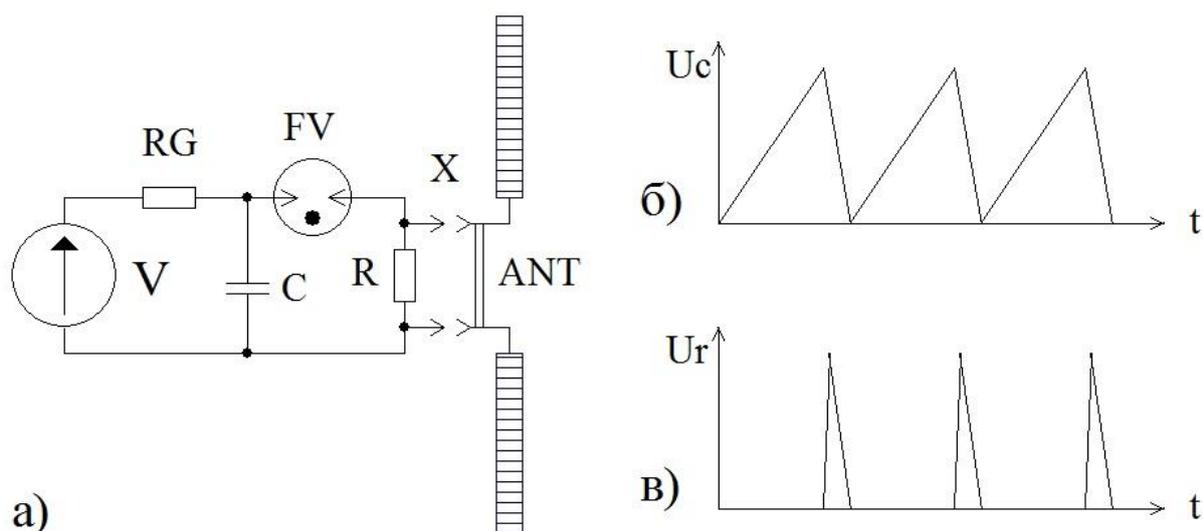


Рис 1. Схема передатчика георадара (а) и временные диаграммы на накопительном конденсаторе  $C$  (б) и разрядном резисторе  $R$  (в).

Антенна с резистивно-нагруженным диполем представляет собой два вибратора, состоящих из токопроводящих сегментов и резисторов, включенных в разрывы между сегментами. Количество резисторов и сегментов может быть различным, обычно используется от 4 до 10 резисторов суммарным сопротивлением от 200 до 1000 Ом. Формирование высоковольтного видеоимпульса производится, как правило, с применением газонаполненного разрядника FV. Передатчик состоит из последовательно соединенных высоковольтного источника питания V, защитного резистора RG, накопительного конденсатора C, газонаполненного разрядника FV, разрядного резистора R и антенны ANT (рис. 1а). При включении высоковольтного источника питания V заряжается накопительный конденсатор C. По достижении напряжения  $U_{c\_max}$  на конденсаторе C (рис. 1б), соответствующего напряжению пробоя разрядника, конденсатор подключается через разрядник FV к передающей антенне, формируя на разрядном резисторе R мощный зондирующий импульс  $U_r$  фиксированной длительности и амплитудой порядка  $U_{c\_max} \cdot L_{ant}$  (рис. 1в). Далее происходит передача энергии в антенну и излучение электромагнитной волны резистивно-нагруженной антенной.

При практической реализации передатчика для снижения паразитных колебаний в резистивно-нагруженном диполе величина резистора близка номиналом к сопротивлению антенны, обычно около 150-300 Ом. При этом номиналы конденсатора C и резистора R передатчика фиксированы, создают импульс определенной длительности и применяются с антеннами различных длин. Согласования передатчика с антенной, необходимого в устройствах с периодическими синусоидальными сигналами, не производится. Это объясняется реализованной низкой эффективностью антенны с целью устранения паразитных колебаний, КПД антенны относительно обычного диполя составляет около 30%. К примеру, при номиналах элементов  $C = 50$  пФ и  $R = 150$  Ом длительность формируемого импульса  $\tau = RC = 7,5$  нс, что соответствует длине одного вибратора антенны 2,25 метра. Это показатели для расположенной в воздухе антенны, без коэффициентов укорочения,

необходимых для антенн, располагаемых на границе сред. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость грунта на поверхности обычно составляет около  $\epsilon = 2,5-3$ , извлеченный для инженерных расчетов квадратный корень, являющийся численным значением коэффициента укорочения, составляет примерно 1,6-1,7, что для импульса  $\tau = 7,5$  нс соответствует длине вибратора 1,4 метра. Получается, что стандартный передатчик георадара «Grot» рассчитан на оптимальную длину антенны 2,4-2,8 метра. Также заметим, что к данному передатчику с фиксированной длительностью формируемого импульса подключаются антенны различной длины, от 10 см до 3 метров. Излучение сигнала в среду, конечно, производится, но с более низкой эффективностью. Разумеется, длина антенны имеет влияние на формирование длительности излучаемого сигнала, но основная фильтрация по полосе пропускания происходит в приемной антенне. И для повышения эффективности излучения и снижения энергопотребления необходим подбор величин накопительного конденсатора и разрядного резистора для формирования импульса определенной длительности для антенны конкретной длины, формула для инженерных расчетов:

$$L_{ант} = 2c(RC / \sqrt{\epsilon}), \quad (1)$$

где:  $L_{ант}$  длина антенны

$c$  – скорость света,  $3 \cdot 10^8$  м/с

$R$  – суммарное сопротивление разрядных резисторов, Ом

$C$  – общая емкость накопительных конденсаторов, Ф

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость грунта.

С другой стороны, производить коммутацию в высоковольтном сильноточном передатчике – процесс не безопасный, поэтому было предложено оптимизировать антенны определенной длины под оптимальную длительность сформированного импульса. Из рис. 1 видно, что процесс формирования видеоимпульса передатчиком и излучение его резистивно-нагруженной антенной – две последовательные решаемые задачи. И конструктивно

эти процессы осуществляются блоками, последовательно соединенными, т.е. времязадающий элемент (накопительный конденсатор), формирующий видеоимпульс, отделен от излучающего элемента, передающей антенны.

В патенте «Направленная антенна подземного излучения» [7] предложена антенна, где элементы резистивно-нагруженного диполя подключены к экрану, и в какой-то степени резисторы уже входят в цепь формирования импульса. Предлагается дальнейшее развитие данной антенны, а именно совместить процесс формирования и излучения импульса, при этом длительность импульса предлагается формировать исходя из длины антенны. Таким образом, будет создан специализированный компактный высоковольтный источник питания и передающая антенна, включающая в себя цепи формирования импульса исходя из конкретной длины антенны. Дополнительно при таком способе снижаются потери в передатчике, выполненном по схеме, приведенной на рис. 1. Вследствие наличия больших токов, протекающих по элементам схемы, ток через разрядный резистор  $R$  и соединяющий его с антенной разъем достигает величин свыше 30 А. При предложенном способе, изложенном в патенте, потери тока в разъемах исключаются, т.к. через них протекает только зарядный ток накопительного конденсатора, имеющий величину менее 5 мА. Разработанная схема антенны с передатчиком приводится на рис. 2. Здесь применена схема питания  $V$  с источником переменного напряжения  $G$ , повышающего трансформатора  $T$  с использованием схемы выпрямления Латура [14], позволяющая от трансформатора с одной вторичной обмоткой получить двухполярное напряжение, что приводит к снижению рабочего напряжения и использованию компонентов с более низкими напряжениями. Количество накопительных конденсаторов удваивается ( $C+$ ,  $C-$ ) и вместе с газонаполненным разрядником  $FV$  переносится в конструкцию антенны, собранной на экране 1. К экрану 1 подсоединен общий вывод трансформатора  $T$  и через стойки 2 концу резистивно-нагруженных вибраторов. В качестве разрядного резистора используются резисторы диполя  $Ra+$ ,  $Ra-$ , изменение сопротивления которых производится по определенному закону, при этом общее сопротивление резко

снижается. Все сопротивления расположены на фольгированном стеклотекстолите, фольга используется в качестве проводников 3 вибраторов антенны. Если для обычного резистивно-нагруженного диполя с целью недопущения возникновения паразитных колебаний сопротивление резисторов каждого вибратора составляет порядка 1 кОм и выше, то применительно к данному решению паразитные колебания не возникают вследствие закорачивания тока антенны через стойки 2 на экран 1, имеющий значительную толщину. Следует заметить, что протекающие по экрану возвратные токи распределены по всей площади экрана, что приводит к снижению уровня распределения поля в задней полусфере. Вследствие этого возможно снижение общего сопротивления резисторов резистивно-нагруженного диполя до 75-100 Ом. На данную схему передатчика георадара получен патент [15]. Использование в конструкции дополнительного диэлектрического материала между диполями и экраном позволяет уменьшить общую высоту антенны, и передатчик может быть использован с различными транспортными средствами для подповерхностной георадиолокации без соприкосновения со средой. При этом есть возможность изменения максимума распределения поля в передней полусфере через изменение расстояния между диполем и экраном, как в антенне патента «Направленная антенна подземного излучения» [7], сохраняется.

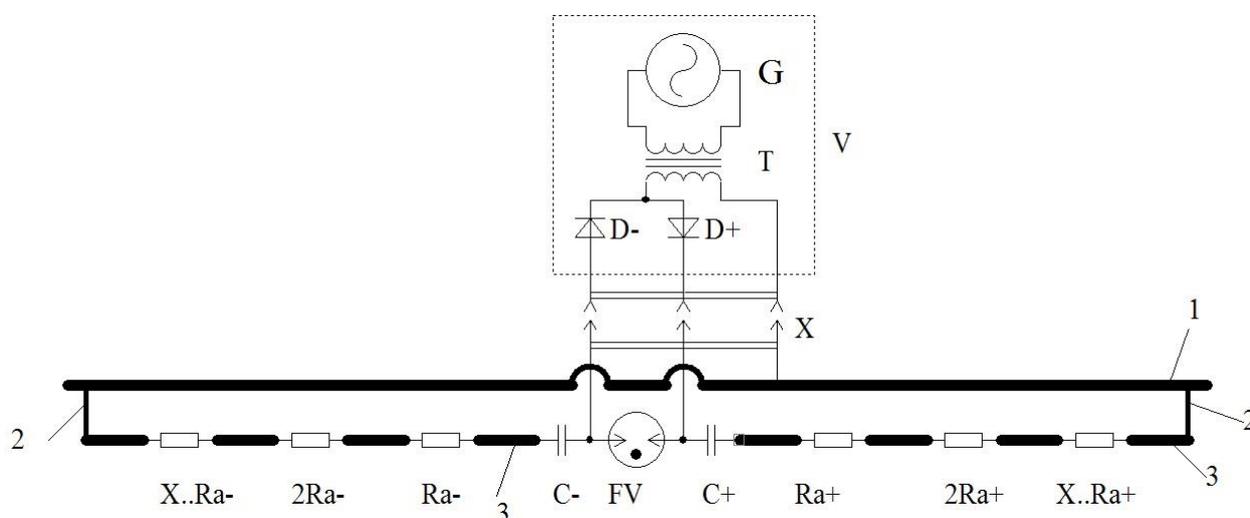


Рис. 2 Схема передатчика георадара, согласованного по длительности с длиной антенны.

Контроль излучаемого сигнала необходим для современных георадаров. В частности, при исследовании характеристик антенн на стенде [6] замечено изменение излучаемого сигнала в зависимости от плотности прилегания передающей антенны к стенке стенда. И это касается не только амплитудных колебаний излучаемого сигнала, присутствуют и временные изменения. Получается, что при проведении георадарной съемки из-за постоянного изменения расстояния между антенной и изучаемой средой практически каждый кадр георадарной съемки производится своим оригинальным импульсом. Учитывая, что в данных глубинной радиолокации также имеются дисперсионные искажения [16], результаты обработки могут не совпадать с данными других методов, к примеру, приходится производить контрольное бурение скважины. Также можно предположить, что дисперсионные искажения имеют аппаратное происхождение. В настоящее время предполагается однолучевое прохождение сигнала по законам геометрической оптики [17], хотя при расчетах годографа используются сигналы, излучаемые под различными углами. В принципе необходимо использовать корреляционную обработку принимаемого сигнала с использованием записи воздушного сигнала прямого излученного импульса в качестве маски для корреляционной обработки. Просмотр принятых радиосигналов позволяет говорить об улучшении результатов, полученных с использованием корреляционной обработки. Использование корреляционной обработки сигналов в дециметровом диапазоне позволило существенно повысить помехоустойчивость связи [18]. Кроме этого в рамках работ по исследованию прохождения радиоволн на трассе Москва-Екатеринбург были разработаны несколько способов синтеза корреляционных кодов для шумоподобных сигналов [19, 20, 21], что позволило проводить корректные исследования многолучевости и в случаях особенно плохих геофизических условий для передачи данных существенно повысить качество связи. Для корреляционной обработки сигналов, отраженных от границы сред, свойственно расширение принимаемого импульса, поэтому для синтезируемых кодов необходимо программно заложить расширение импульса

в зависимости от расстояния прохождения принимаемого сигнала. Результаты такой свертки позволят более точно определить время распространения сигнала до границы среды и от границы до приемника.

Другой важный аспект использования антенн данного типа состоит в снижении уровня распределения поля в задней полусфере. Проанализируем этот факт с точки зрения безопасности здоровья оператора. Если обратить внимание на длительность записи одного кадра в волновой форме, то минимальное время 2 мкс затрачивает георадар «Грот-12» [9], передатчик формирует импульс амплитудой 5 кВ и длительностью 7 нс с частотой повторения менее 50 Гц. Георадар «Лоза» [10] в волновой форме затрачивает на запись одного кадра около 0,5 с, в бинарном режиме также записывает около 2 мкс, передатчик формирует импульс амплитудой 5 кВ и длительностью 7 нс с частотой повторения 1 кГц. По классическим стробоскопическим георадарам типа «Око» [11] точной информации нет. Измеренные выходные параметры георадара «Питон» имеют амплитуду излучаемого сигнала до 600 В/м, длительность 10 нс, частота излучения импульсов до 100 кГц. И, если увеличивать мощность излучаемого сигнала, то будет нанесен вред здоровью оператора. Максимальные допустимые уровни напряженности электрического поля в диапазоне частот от 50 до 300 МГц не должны превышать 80 В/м [22, 23]. Такая же проблема у георадара «Лоза»: при использовании передатчика с импульсной амплитудой 5 кВ уровень электромагнитного излучения радиочастотного диапазона находится в пределах значений предельно допустимого уровня. При повышении амплитуды выше 15 кВ или применении антенн длиной более 3 метров оператору желательно быть на некотором отдалении от передатчика, что, например, выполняется при использовании антенн длиной свыше 3-4 метров, один оператор обычно находится спереди на удалении 3-4 метра от края антенны, второй отстает от передатчика также на 3-4 метра.

## Заключение

Предложена система излучения для импульсного георадара, совмещающая процессы формирования видеоимпульса и излучения электромагнитной волны. Она имеет более низкий уровень распределения поля в задней полусфере, что может быть использовано при разработке антенно-фидерных систем для классических георадаров с использованием приемников со стробоскопическим эффектом и георадаров излучающих мощные импульсы с частотами 1 кГц.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00083).

## Литература

1. Попов А.В. и др. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23. – №. 4. – С. 28.
2. Гулевич О.А. Георадиолокация больших глубин // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. Т.2./ Под ред. В.Д. Кузнецова. – М.: ИЗМИРАН, 2018. – С. 120-133.
3. Едемский Д.Е., Гарбацевич В.А., Попов А.В., Прокопович И.В. Опыт георадарного зондирования с воздушного носителя // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс]: научное электронное издание. – Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. – С.797-803
4. Edemsky D., Popov A., Prokopovich I., Garbatsevich V. Airborne Ground Penetrating Radar, Field Test // Remote Sensing V. 13 N 4 P. 667. 2021.
5. Грант РФФИ №18-02-00185, (2018-2020 гг.) «Изучение пространственно-временных характеристик импульсного георадара для оптимизации глубины зондирования и разрешающей способности»

6. Сахтеров В.И. Измерение характеристик антенн георадаров // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс]: научное электронное издание. – Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2021. – С.596-600
7. Сахтеров В.И. Направленная антенна для подземного излучения. Патент на изобретение №RU2753250С1, зарегистрирован в Госреестре 15.08.2021 г.
8. Сахтеров В.И., Прокопович И.В., Попов А.В. Экранированная дипольная антенна для задач радиолокационного каротажа // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 8. – С. 103-112.
9. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-3» // Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации ООО «Логические системы» Россия, Московская область 2018 год, <https://www.geotech.ru/>
10. <http://www.geoscanners.com>
11. 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 №5 2012г., 3-5
12. Беркут А.И., Копейкин В.В., Морозов П.А., Попов А.В., Ульяновцев Н.А., Инговатов А.П., Маякова О.П., Морозов А.Ф. Принципы повышения глубины зондирования и опыт применения низкочастотных георадаров серии «Лоза» // Сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции. Москва, 16–18 апреля 2018 года М.: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов 2018 С87-88
13. Wu T.T., King R.W.P. The Cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. IEEE Trans. Antennas Propag. 1965. V.13. No.3 P.369-373.
14. Электропитание устройств связи. Под ред. В.Е. Китаева. Учебник для вузов. – М.: «Связь» 1975. С.154
15. Сахтеров В.И. «Передатчик георадара». Патент на изобретение RU2799486С1, зарегистрирован в Госреестре 05.07.2023 г.

16. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Мингалев И.В., Суворова З.В., Ахметов О.И., Мингалев О.В., Резников А.Е. О распространении видеоимпульсных сигналов в диссипативных средах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №11.
17. Сахтеров В.И., Аверин А.А., Попов А.В., Прокопович И.В. К расчету антенн импульсного георадара // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. –Муром: МИ ВлГУ, 2022. С.485-488
18. Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Щвец Д.П. Коротковолновая широкополосная радиостанция «АНГАРА—5М» // Радиотехника и электроника. 2002. — Т.47. — №.9 — С. 1149—1152.
19. Лобзин В.В., Сахтеров В.И., Копейкин В.В., Лобзина А.Н., Аннакулиев С.К., Волкомирская Л.Б., Морозов П.А., Старостин С.В., Резников А.Е. Генетический метод синтеза шумоподобных фазоманипулированных сигналов и их ансамблей // Радиотехника и электроника. 2001. — Т.46. — №2. — С. 194—200.
20. Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Сахтеров В.И., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е. Современные методы комбинаторной оптимизации в задачах синтеза сложных фазоманипулированных сигналов для широкополосных систем связи // – Сборник докладов Всероссийской научной конференции. Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2003.- 546с. — С. 131—135.
21. Копейкин В.В., Лобзин В.В., Лобзина А.Н., Пудиков М.В., Сахтеров В.И. Синтез фазоманипулированных сигналов методом отжига // Препр. 3(1131) — М.: ИЗМИРАН, 2000 г. 10 с.

22. Сахтеров В.И., Лобзин В.В., Писарев Р.В., Волкомирская Л.Б. Аппаратурный комплекс для исследования многолучевого характера распространения декаметровых радиоволн и результаты первых экспериментов на трассе Москва–Екатеринбург // Тезисы докладов. X региональная конференция по распространению радиоволн. – Санкт-Петербург: НИИ Химии СПбГУ, 2004 г. – С. 50.
23. Пупатенко К.В., Пупатенко В.В. Оценка воздействия электромагнитного излучения радиочастотного диапазона на операторов георадаров серии «Лоза-В» // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях дальнего востока. Межвузовский сборник научных трудов. Под редакцией В.С. Шварцфельда. Хабаровск, 2009 Издательство: Дальневосточный государственный университет путей сообщения (Хабаровск) С140-147.
24. Пупатенко К.В., Нелюбов П.А. Исследование электромагнитного излучения радиочастотного диапазона георадара «Лоза» // Проектирование развития региональной сети железных дорог – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. –№ 7. С. 78-83.

**Для цитирования:**

Сахтеров В.И. Антенна импульсного георадара. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.18>