
Антенны и техника диапазона СВЧ

Научная статья
УДК 621.3.091.22
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202403-06>

Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны

А.А. Аверин¹, Д.С. Горкин², В.В. Варенков³, В.И. Сахтеров⁴

¹⁻⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) (г. Троицк, Россия)

² ООО «Интерраскан» (Москва, Россия)

¹ averin@izmiran.ru, ² gorkin@izmiran.ru, ³ varenkov@mail.ru, ⁴ sakhterov@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время в импульсной георадиолокации широко применяются дипольные антенны с резистивно-нагруженными вибраторами. Основным свойством таких антенн является излучение электромагнитной волны в подповерхностную среду с быстрым затуханием сверхширокополосного импульса к концу вибраторов без отражения. При снижении общего сопротивления вибратора ниже 200 Ом в данной антенне возникают паразитные автоколебания, ограничивающие увеличение подводимой к антенне мощности.

Цель. Разработать дипольную антенну для подповерхностной георадиолокации с возможностью снижения импеданса антенны ниже 200 Ом для повышения излучаемой мощности и увеличения глубины георадиолокации.

Результаты. Предложена конструкция дипольной антенны с подключенными параллельно несколькими резистивно-нагруженными вибраторами. Показано, что общее сопротивление единичного вибратора выбирается исходя из требований по устойчивости и предотвращению паразитных автоколебаний. Однако импеданс дипольной антенны снижается пропорционально количеству подключенных вибраторов.

Практическая значимость. Дипольная антенна с пятью вибраторами, подключенными и расположенными параллельно друг другу, имеет усиление на 10 дБ выше по сравнению с диполем, имеющим единичный резистивно-нагруженный вибратор. Эксперименты с трёхметровыми дипольными антеннами показали увеличение глубины зондирования в условиях Подмосковья с 14 до 20 м.

Ключевые слова

Импульсный георадар, резистивно-нагруженная антенна, диполь, усиление антенны, сверхширокополосный сигнал

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

Для цитирования

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: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202403-06>

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

Введение

В импульсной георадиолокации широко применяются резистивно-нагруженные дипольные антенны [1]. Ранние версии георадара «Грот» позволяли зондировать подповерхностную среду на глубины до 10 м, а разработанные в то же время антенны были оптимальны для данной конфигурации прибора [2].

При дальнейшем развитии приборов серий «Грот» и «Лоза» произошло увеличение размеров антенн как в длину (гибкие трубчатые антенны в изолированных шлангах диаметром 25 мм и длиной до 50 м [3]), так и в ширину (пластинчатые вибраторы дипольных антенн шириной до 30 см и длиной антенны до 10 м [4]). При этом для геологических исследований изменилась конфигурация прибора, а

© Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И., 2024

именно вместо стандартного параллельного расположения дипольных антенн на расстоянии длины антенны друг от друга стали применять последовательное расположение антенн приемника и передатчика. Данный способ измерения используется в сложных инженерно-геологических условиях, таких как лес, болота, строительные участки, т.е. когда сложно соблюдать необходимое расстояние между параллельно расположенными антеннами передатчика и приемника. В некоторых случаях это единственный способ проведения геологических работ.

Сравнительные измерения на стенде показали изменения формируемой диаграммы направленности в ближней зоне в зависимости от ширины антенны. При ширине более 10 см она становится практически круговой [5]. Оба типа антенн применимы. *Широкие пластинчатые антенны* имеют более высокое усиление при равных длинах, но уступают по разрешению и обладают большим весом и габаритами. В то же время *гибкие трубчатые антенны* имеют хорошую электрическую защищенность и при последовательном расположении позволяют проводить георадарное профилирование до нескольких километров в день, в том числе с использованием транспортных средств с низкой скоростью передвижения.

Производители приборов используют свои технологии изготовления резистивно-нагруженных антенн, применяя при этом наработанные способы формирования характеристик антенн, изменяя количество резисторов, суммарное сопротивление вибраторов и т.д. Увеличение глубины георадиолокации достигается повышением излучаемой мощности или эффективности антенно-фидерных устройств (АФУ). Повышение качества принимаемого сигнала с помощью накопления относится к части программной обработки и в данной статье не рассматривается.

Стандартный передатчик импульсных георадаров «Грот» и «Лоза» формирует сверхширокополосный (СШП) импульс длительностью 4 нс и амплитудой 5 кВ. По сути, это искровой передатчик Герца с ударным возбуждением антенны, причем характеристики излучения электромагнитной волны формируются параметрами антенны. Для увеличения глубины зондирования выпускаются передатчики с амплитудой СШП-импульсов 16 кВ и выше. При этом амплитуды передатчиков георадаров «Грот» и «Лоза» немного отличаются. Это связано с тем свойством разрядника, что для различных скоростей нарастания напряжения на накопительном конденсаторе уровень динамического напряжения пробоя имеет различные значения: минимальное значение при постоянном напряжении, а с увеличением скорости нарастания напряжения порог пробоя становится выше. Пределы изменения динамического напряжения пробоя приведены в параметрах конкретного прибора.

Поскольку «Грот» реализован с использованием 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и производит георадиолокацию в одной точке за такт, то частота формирования СШП-импульсов передатчиком минимальна (менее 20 Гц). Георадар «Лоза» реализован на одnorазрядном АЦП, т.е. на компараторе, и для георадиолокации необходимо произвести сравнение уровней и запись сигнала на каждом уровне (256 раз в одной точке). В этих условиях частота формирования СШП-импульсов передатчиком не менее 250 Гц. Увеличение частоты формирования СШП-импульсов более чем в 10 раз вызывает высокую скорость нарастания напряжения с источника питания, поэтому порог динамического напряжения пробоя выше. Глубина георадиолокации «Лозы» выше на 5–7%, однако выход из строя газонаполненных разрядников замечается чаще.

Дальнейшее повышение амплитуды СШП-сигналов возможно при использовании разрядников на более высокое напряжение пробоя или при использовании схемы последовательного включения разрядников [6]. Применение данной схемы для изготовления передатчика с амплитудой СШП-импульса 60 кВ позволило «Гроту» достичь глубин георадиолокации более 400 м [7]. При работе с «Гротом» достижимо дальнейшее повышение амплитуды СШП-импульса. Для георадара «Лоза» запись данных возможна только при бинарном режиме (20 Гц), при работе с записью волновой формы (250 Гц) будет превышение допустимых норм электромагнитного излучения [8]. По этой же причине не повышают амплитуду СШП-импульсов в классических малоглубинных георадарах выше 600 В, поскольку частота формирования СШП-импульсов для стробоскопического осциллографа достигает 100 кГц, что также приведет к превышению допустимых норм электромагнитного излучения.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать дипольную антенну для подповерхностной георадиолокации с возможностью снижения импеданса антенны ниже 200 Ом для повышения излучаемой мощности и увеличения глубины георадиолокации.

Материалы и методы решения задачи

Рассмотрим повышение глубины георадиолокации в аспекте АФУ. Увеличение качества радиосвязи через повышение эффективности АФУ энергетически более оправдано, чем через повышение мощности передатчика. Увеличение усиления АФУ на 3 дБ для передатчика означает повышение мощности в два раза.

Так, при проведении экспериментов на трассе г. Москва – г. Екатеринбург в декаметровом диапазоне широкополосными сигналами мощность передатчика составляла 200 Вт, применялась широкополосная V-образная антенна с усилением 5–7 дБ. Далее после определения необходимых частот прохождения радиосигнала применялась трехдиапазонная антенна «волновой канал» с усилением 7–13 дБ (для разных диапазонов), что позволило снизить выходную мощность передатчика до 100 Вт [9]. При некоторых экспериментах устойчивая связь фиксировалась при выходной мощности 50 Вт.

В георадиолокации ситуация аналогична. Для ограничения амплитуды излучаемого СШП-импульса повышают эффективность АФУ через увеличение длины и ширины вибраторов антенны. Такие антенны, как упоминалось выше, применяются у георадаров «Лоза», по этому же пути пошли изготовители георадара «Питон» [10]. Однако увеличение ширины вибраторов ограничивается возможностями использования георадара: АФУ шириной 0,5 м и длиной 2 м удобно применять на открытых пространствах или в зимнее время, но крайне неудобно при наличии растительности, особенно кустарников.

Для импульсных георадаров эффективность АФУ повышается через снижение общего сопротивления вибраторов. Резистивно-нагруженные антенны импульсных георадаров имеют суммарное сопротивление одного вибратора порядка 1 кОм [11]. Данная величина определена в результате натурных экспериментов как наиболее универсальная антенна для измерения при различных свойствах измеряемой среды. Так, измерения в водоемах можно проводить обычными проволочными диполями без потери качества и возникновения паразитных колебаний. Хотя для увлажненных сред применяются антенны с суммарным сопротивлением вибраторов порядка 200–250 Ом, для измерений на сухих грунтах их уже нельзя использовать, поскольку в таких условиях происходит возникновение паразитных колебаний. Тогда георадарные измерения невозможны, поскольку потребуются дополнительная цифровая фильтрация со снижением общего динамического диапазона.

Для георадиолокации сред, которые имеют разные сопротивления, влажность и диэлектрическую проницаемость необходимо иметь как минимум четыре типа антенн с различными сопротивлениями вибраторов: 150, 250, 500 Ом и 1 кОм (для качественного согласования с грунтом и повышения эффективности георадара в целом). Данный набор позволяет покрывать требования для исследования практически всех основных сред. При увлажненных средах или сырых почвах на передатчик устанавливается антенна с сопротивлением вибраторов 250 Ом, на приемник – 150 Ом. Для сухих сред: на передатчик – 1 кОм, на приемник – 250–500 Ом. Для промежуточных сред на передатчик устанавливается антенна с сопротивлением вибраторов 500 Ом, а на приемник – в зависимости от дополнительных условий: возможно и 250 Ом, и 1 кОм.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования получены амплитудные изменения излучения резистивно-нагруженных антенн, измеренные в ближней зоне, которые представлены на рис. 1. Данные приводятся для сравнения различных антенн в одинаковых условиях. Измерены параметры антенн длиной 1 м и шириной 23, 34 и 60 мм, при этом для антенн всех ширин изготовлены вибраторы с суммарным сопротивлением 250 Ом и 1 кОм. Амплитуда СШП-импульса, подводимого к антеннам, равна 5,5 кВ, радиус полуцилиндрического стенда – 0,65 м, высота стенда – 1,25 м. Измерение производилось антенной длиной 0,5 м и шириной 5 мм, регистратор имеет входное сопротивление 50 Ом, амплитуда принимаемых сигналов измеряется в вольтах и указана на разметке от центра вверх.

Проведенные измерения показали, что в зависимости от направления центрального или бокового излучения увеличение амплитуды излучаемого СШП-импульса определяется шириной вибраторов. У антенны сопротивлением вибраторов 1 кОм увеличение ширины вибратора от 23 мм до 60 мм вызывает увеличение центрального излучения на 13%, бокового на 24%, что, в принципе, и было ранее установлено экспериментальным подбором. У антенн с сопротивлением вибраторов 250 Ом ситуация меняется –

центральное излучение вырастает на 23%, величина бокового излучения – на 11%. При сравнении видно, что амплитуда излучения низкоомных антенн выше в центре на 46%, у бокового излучения – на 33%.

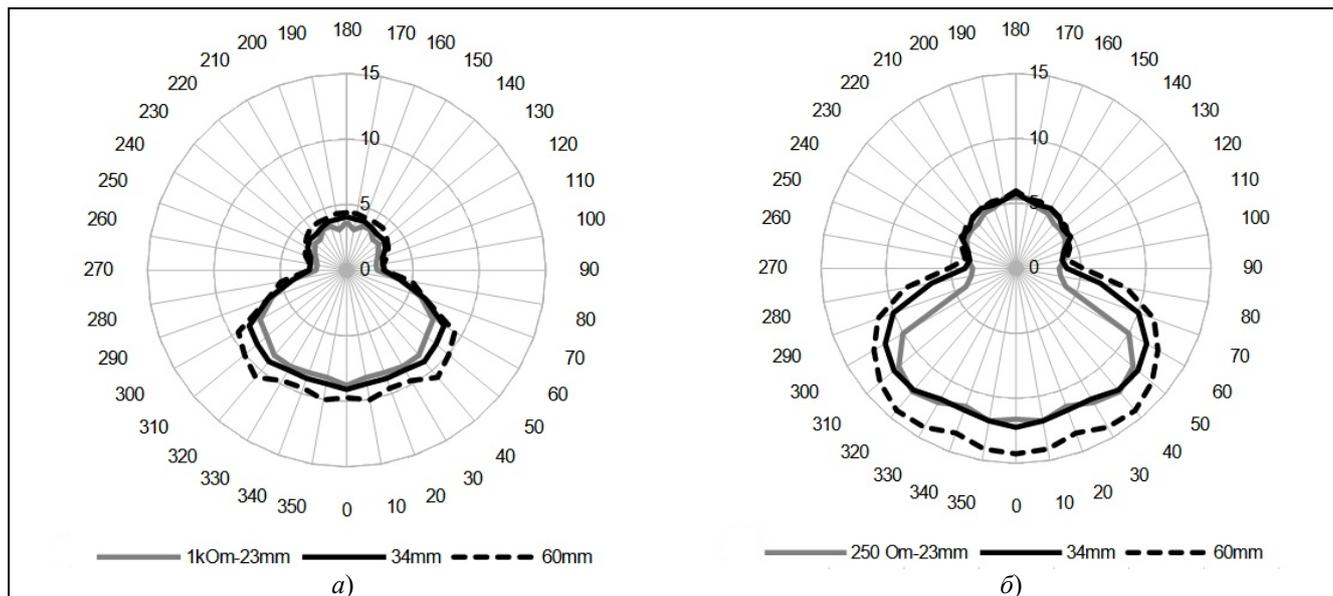


Рис. 1. Амплитудные изменения излучения резистивно-нагруженной антенны в ближней зоне для различной ширины вибратора: *a* – при сопротивлении 1 кОм; *b* – при сопротивлении 250 Ом

Fig. 1. Amplitude variations of radiation of a resistively loaded antenna in the near zone for different vibrator widths: *a* – at a resistance of 1 kOhm; *b* – at a resistance of 250 Ohm

Поскольку дальнейшее снижение сопротивления вибраторов вследствие возникновения паразитных колебаний нежелательно, то было предложено параллельное подключение нескольких одинаковых вибраторов к одному передатчику. Для проведения экспериментов использованы до пяти параллельных вибраторов, вид антенны представлен на рис. 2. Это дает дальнейшее снижение импеданса антенны, и при сопротивлении одного вибратора 250 Ом сопротивление пяти вибраторов дипольной антенны становится равным порядка 50 Ом, что увеличивает ток антенны и приводит к повышению интенсивности излучения диполя. Стоит отметить, что в отличие от систем с периодическими сигналами при использовании резистивно-нагруженных антенн нет жестких требований по согласованию передатчика с АФУ, и подключение одновременно нескольких вибраторов параллельно не приводит к повреждению передатчика.

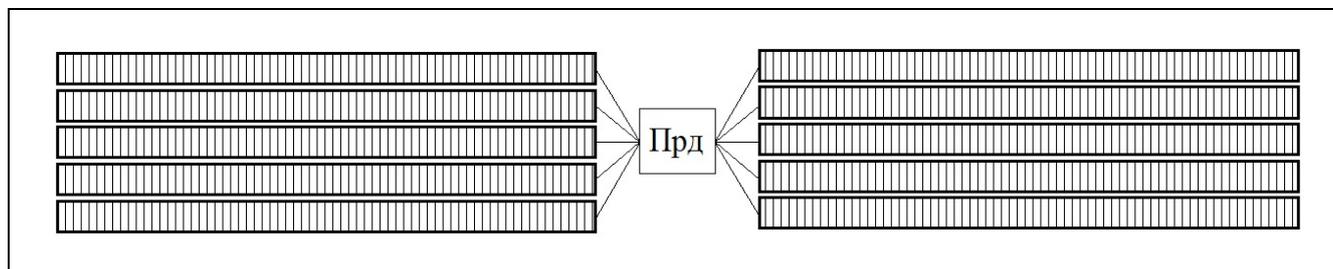


Рис. 2. Внешний вид дипольной антенны с параллельными подключенными вибраторами

Fig. 2. The appearance of a dipole antenna with parallel connected vibrators

Для регистрации радарограмм был разработан двухканальный макет приемного устройства георадара для одновременной фиксации данных в волновой форме. Каждый канал управляется отдельно, их усиление и дискретизация раздельны [12]. На рис. 3 приведена схема данного макета. Резистивно-нагруженная дипольная антенна подключена к устройству согласования, далее сигнал разделяется на два канала, имеющих отдельно управляемые усилители, при этом каждый канал имеет разные диапазоны усиления. Далее АЦП передают полученную информацию микропроцессору, по радиоканалу данные поступают на смартфон для визуализации радарограммы и последующего хранения данных. Управление также производится со смартфона.

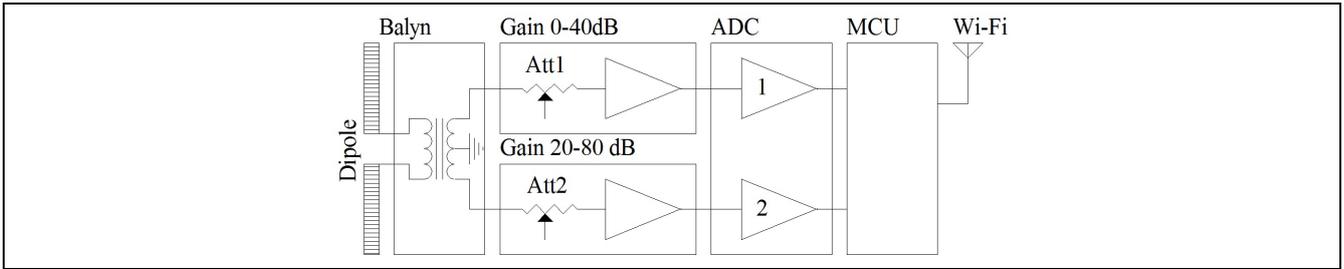


Рис. 3. Схема макета двухканального приемника георадара

Fig. 3. Diagram of the layout of a two-channel georadar receiver

На рис. 4 показан сигнал радарограммы для одной точки профиля на входе АЦП при различных параметрах входного аттенюатора георадара. При ослаблении 36 дБ наблюдается полная волновая форма, без видимых ограничений, сигнал затухает в районе 200 нс; при ослаблении 0 дБ сигнал имеет максимальную продолжительность до 1000 нс, но в начале шкалы ограничен по амплитуде. Таким образом, оператор устанавливает необходимое количество каналов и уровни ослабления в них, исходя из требований выполняемой задачи – геологическая или инженерная работа, какая глубина необходима. Кроме того, можно произвести суммирование сигналов обоих каналов в цифровом виде и получить полную волновую форму принятого сигнала.

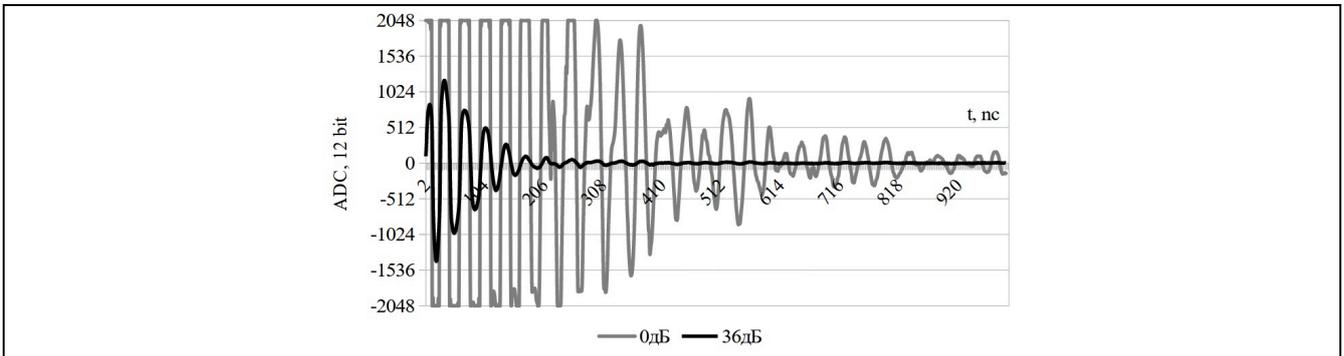


Рис. 4. Графическое представление сигналов на входе АЦП для различных уровней ослабления входного сигнала

Fig. 4. Graphs of the signals at the ADC input for different levels of attenuation of the input signal

Для сравнения результатов антенны с низким импедансом были проведены эксперименты с пятью вибраторами, подключаемыми к передатчику и приемнику в количестве от одного до пяти.

На рис. 5 приводится изменение амплитуды принимаемого сигнала профиля радарограммы на входе АЦП в одной точке при подключении разного количества вибраторов дипольной антенны – от одного до пяти.

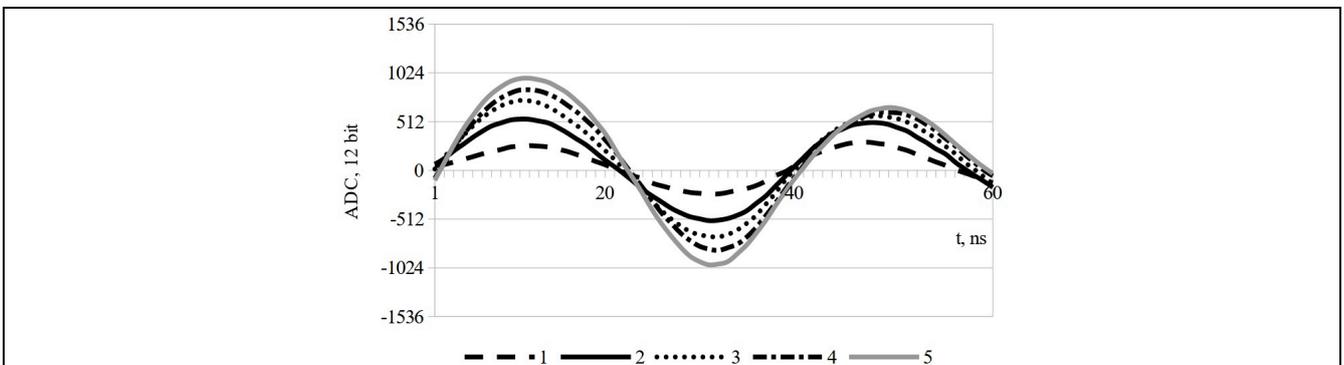


Рис. 5. Графическое представление изменения амплитуды сигналов радарограммы для разного количества подключенных вибраторов дипольной антенны

Fig. 5. Graphical representation of changes in the amplitude of radar signals for a different number of connected vibrators of a dipole antenna

На рис. 6 представлено изменение усиления антенны для разного количества подключенных вибраторов при разных уровнях ослабления аттенюатора георадара. Увеличение усиления на 2 дБ при ослаблении 0 дБ объясняется искажениями дополнительных входных цепей защиты приемника, что приводит к нелинейному усилению. При ослаблении 18 и 36 дБ разность между измерениями снижается.

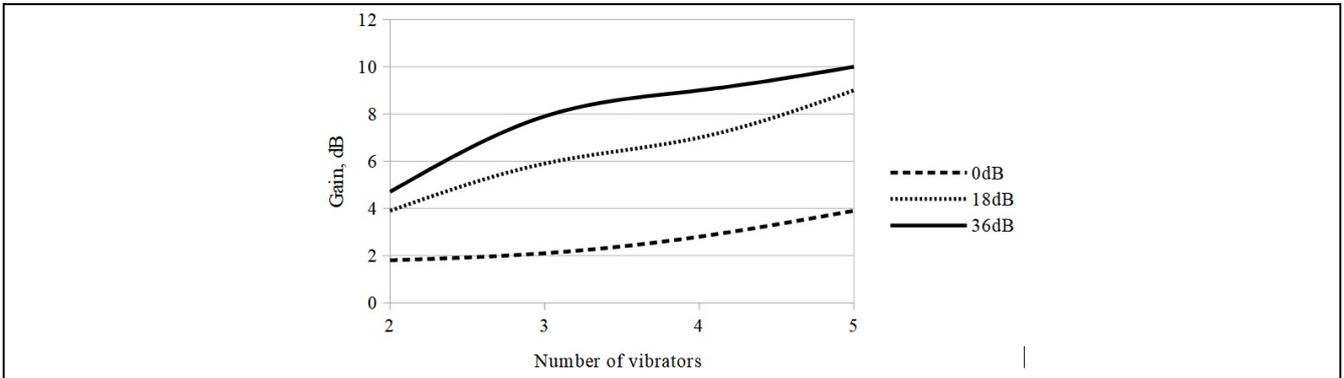


Рис. 6. Графическое представление изменения усиления антенны для разного количества вибраторов при разных уровнях ослабления

Fig. 6. Graphical representation of antenna gain changes for different numbers of vibrators at different attenuation levels

Повышение количества вибраторов антенны до шести и более еще дает усиление, но прирост относительно пятивибраторной антенны незначителен и требует дополнительного исследования.

На рис. 7 приведены волновые формы радарограмм для дипольных антенн различных конструкций: трубчатая антенна (диаметр трубы 12 мм) длиной 3 м; пластинчатая антенна (вибраторы шириной 25 см) длиной 3 м; плоская пятивибраторная антенна (пять трубок диаметром 12 мм, на расстоянии 5 см друг от друга) длиной 3 м. Оператор пунктиром поместил максимальные глубины георадиолокации: 14, 16 и 20 м. Результаты измерений показывают, что усиление плоской пятивибраторной дипольной антенны выше одиночного трубчатого диполя на 10 дБ, относительно пластинчатого диполя усиление выше на 3,3 дБ. Визуализация радарограмм произведена в программной среде MATRIX [13].

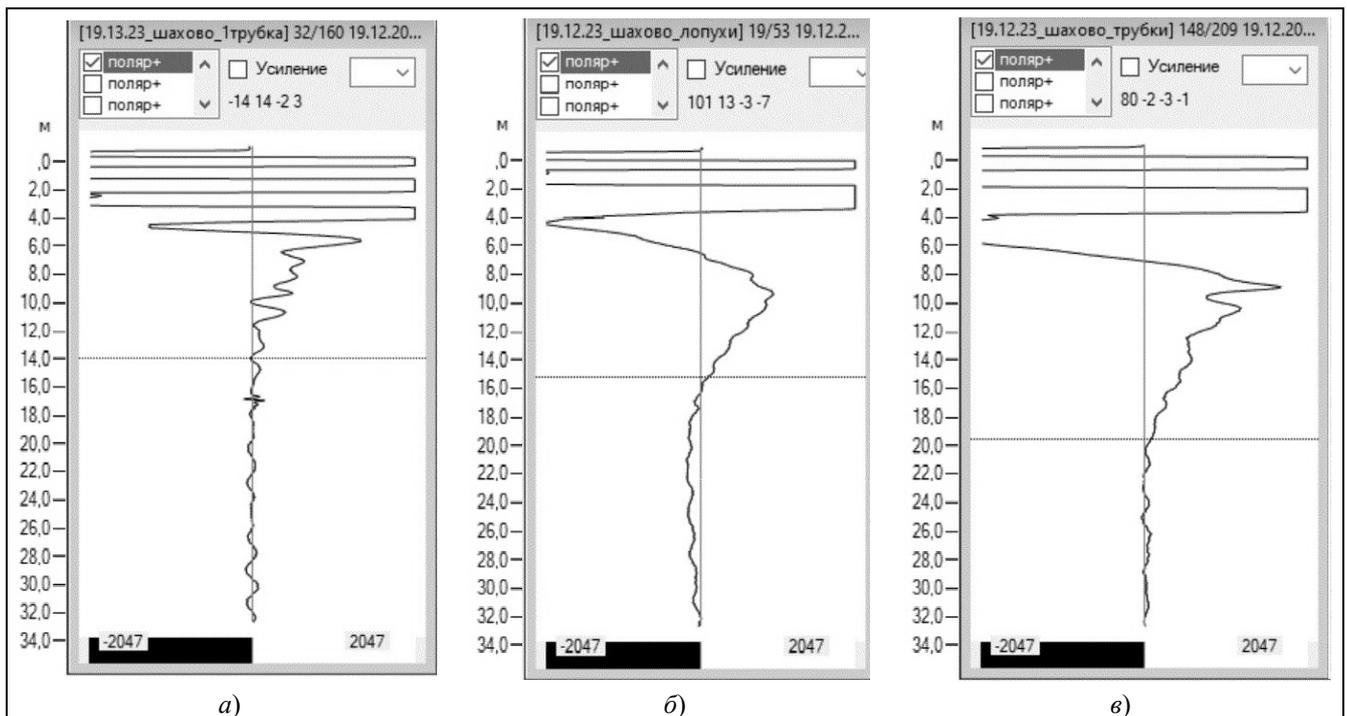


Рис. 7. Волновые формы радарограмм: а – трубчатая антенна; б – пластинчатая антенна; в – пятивибраторная антенна

Fig. 7. Waveforms of radarograms: a – tubular antenna; b – plate antenna; c – five-vibratory antenna

При этом разрешающая способность плоских пятивибраторных диполей не уступает разрешающей способности одиночного трубчатого диполя и лучше пластинчатого плоского диполя шириной 25 см при их одинаковой длине. На рис. 8 это заметно благодаря количеству выявленных слоев: четыре слоя на уровне 0, 2, 4, 6 м для трубчатой и плоской пятивибраторной антенн, а для пластинчатого диполя выявлено три слоя на уровне 0, 2, 4 м.

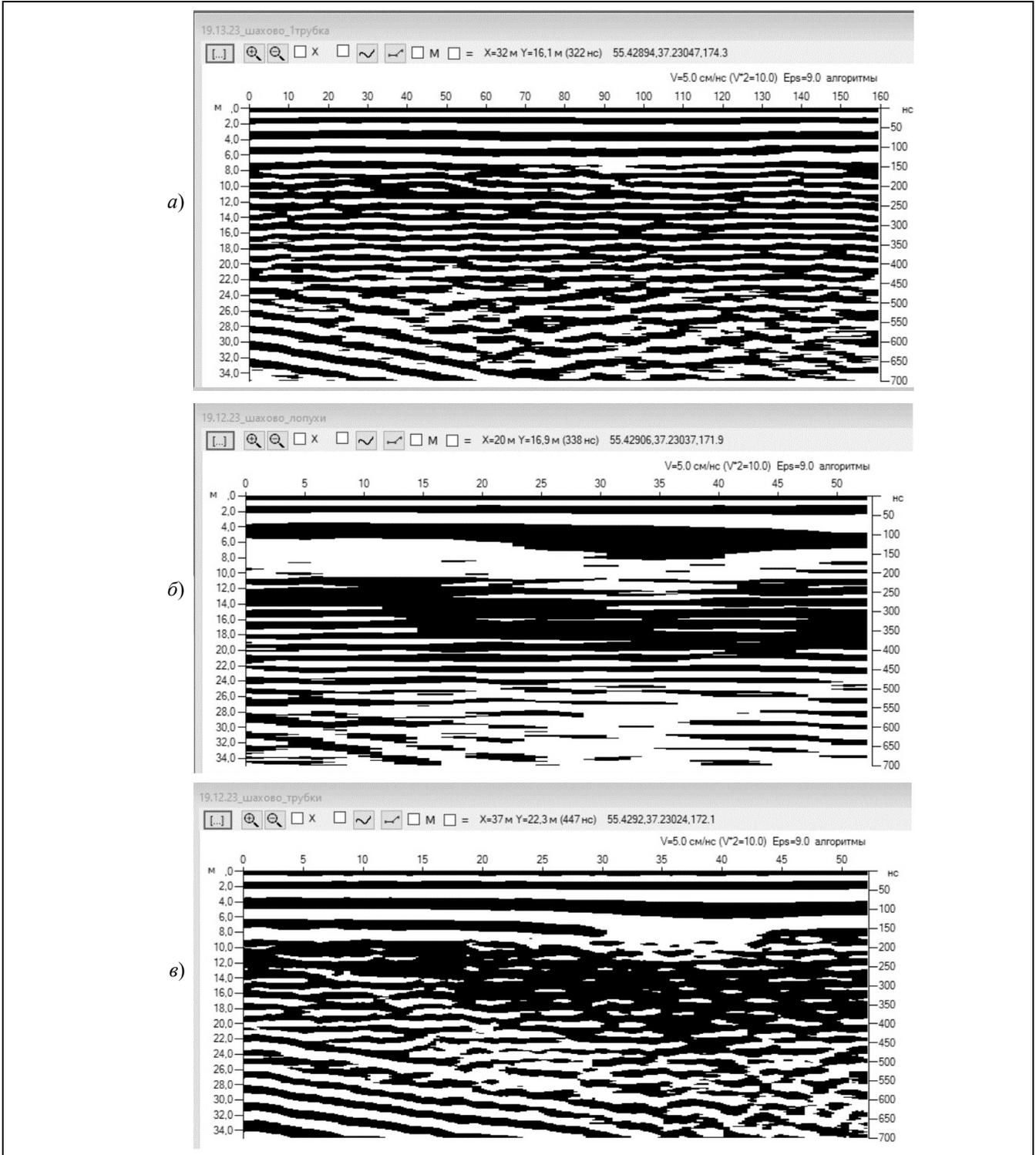


Рис. 8. Радарограммы: а – трубчатая антенна; б – пластинчатая антенна; в – пятивибраторная антенна

Fig. 8. Radarograms: a – tubular antenna; b – plate antenna; c – five-vibrator antenna

При этом изолированные вибраторы, изготовленные из гибких трубчатых проводников, допускают скручивание для уменьшения общего диаметра дипольной антенны и обладают всеми достоинствами плоской пятивибраторной дипольной антенны, а также более высокими эксплуатационными характеристиками, чем пластинчатый диполь, что позволяет его использовать в сложных инженерно-геологических условиях.

Заключение

В результате исследования предложен способ увеличения глубины зондирования через снижение импеданса антенны путем уменьшения общего резистивного сопротивления вибраторов до минимального уровня. Дальнейшее снижение импеданса дипольной антенны производится подключением параллельно нескольким вибраторов с минимальным резистивным сопротивлением. Эксперименты с трёхметровыми пятивибраторными дипольными антеннами показали увеличение глубины зондирования в условиях Подмосквы с 14 до 20 м по сравнению с трёхметровой трубчатой антенной.

Список источников

1. *Wu T.T., King R.W.P.* The Cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373. DOI 10.1109/TAP.1965.1138429.
2. Патент на изобретение RUS2080622 от 27.05.1997. Устройство для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности / *Гарбацевич В.А., Копейкин В.В., Кюн С.Е., Щекотов А.Ю.*
3. *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.
4. *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.
5. *Сахтеров В.И.* Измерение характеристик антенн георадаров // Труды XXVII Всерос. открытой науч. конф. «Распространение радиоволн». Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта. 2021. С. 596–600.
6. Патент на полезную модель RUS219610U1 от 27.07.2023. Передатчик георадара / *Горкин Д.С., Сахтеров В.И.*
7. *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.
8. *Пупатенко К.В., Нелюбов П.А.* Исследование электромагнитного излучения радиочастотного диапазона георадара «ЛЮЗА» // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С. 78–83.
9. *Сахтеров В.И.* Исследование распространения радиоволн декаметрового диапазона на среднелатитной трассе с применением широкополосных сигналов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. ИЗМИРАН. Троицк. 2005. 111 с.
10. *Панин А.В., Барышников Г.Я., Никифоров К.Е.* Использование георадара «Питон-3» для изучения «Гигантской ряби течения» в Горном Алтае // Сборник науч. статей III Междунар. науч.-практич. конф. «Использование цифровых средств обучения и робототехники в общем и профессиональном образовании: опыт, проблемы, перспективы». Барнаул: Алтайский государственный университет. 2017. С. 99–104.
11. *Сахтеров В.И.* Измерение характеристик антенн георадара // Тезисы докладов I Российской науч. конф. «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества». Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения. 2020. С. 50–51.
12. Патент на полезную модель RUS218691U1 от 06.06.2023. Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности / *Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И.*
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663673 от 27.06.2023. Программа для ЭВМ: MATRIX / *Горкин Д.С., Варенков В.В.*

Информация об авторах

Александр Анатольевич Аверин – инженер

SPIN-код: 1995-8814

Дмитрий Сергеевич Горкин – вед. инженер

SPIN-код: 5641-7300

Владимир Викторович Варенков – науч. сотрудник

SPIN-код: 6186-9270

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

SPIN-код: 7559-8325

Статья поступила в редакцию 17.03.2024

Одобрена после рецензирования 23.04.2024

Принята к публикации 26.05.2024

Original article

Increasing the probing depth of pulsed GPR by reducing the antenna impedance

A.A. Averin¹, D.S. Gorkin², V.V. Varenkov³, V.I. Sakhterov⁴

¹⁻⁴ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN) (Troitsk, Russia)

² LLC Interraskan (Moscow, Russia)

¹ averin@izmiran.ru, ² gorkin@izmiran.ru, ³ varenkov@mail.ru, ⁴ sakhterov@mail.ru

Abstract

At the present time, dipole antennas with resistively loaded vibrators are widely used in pulsed georadar. The main property of such antennas is the emission of an electromagnetic wave into the subsurface medium with rapid attenuation of the ultra-wideband pulse to the end of the vibrators without reflection.

When the total resistance of the vibrator decreases below 200 Ohms, parasitic self-oscillations appear in this antenna, limiting the increase in power supplied to the antenna.

Development of a dipole antenna for subsurface ground penetrating radar with the ability to reduce the antenna impedance below 200 Ohms to increase the radiated power and increase the depth of ground penetrating radar. The design of a dipole antenna with several resistively loaded vibrators connected in parallel is proposed. The total resistance of a single vibrator is selected based on the stability requirements to prevent parasitic self-oscillations, but the impedance of the dipole antenna decreases in proportion to the number of connected vibrators.

A dipole antenna with five dipoles connected and arranged parallel to each other has a gain 10 dB higher compared to a dipole with a single resistively loaded dipole. Compared to a plate antenna 3 meters long and 25 cm wide, a five-vibrator dipole antenna of the same length has a gain of 3.3 dB higher.

Another advantage of the proposed antenna is its higher resolution. At the same time, insulated vibrators made of flexible conductors allow twisting to reduce the overall diameter of the dipole antenna, which allows its use in difficult engineering and geological conditions. Experiments with three-meter dipole antennas showed an increase in sounding depth in the Moscow region from 14 to 20 meters.

Keywords

Pulsed georadar, resistively loaded antenna, dipole, antenna gain, ultra-wideband signal

For citation

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: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202403-06> (in Russian)

References

1. Wu T.T., King R.W.P. The Cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373. DOI 10.1109/TAP.1965.1138429.
2. Patent for the invention RUS2080622 dated 27.05.1997. Device for radar sensing of the underlying surface. *Gorbatsevich V.A., Kopeikin V.V., Kuhn S.E., Shchekotov A.Yu.* (in Russian)
3. *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)
4. *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)
5. *Sakhterov V.I.* Measuring the characteristics of GPR antennas. *Proceedings of the XXVII All-Russian Scientific Conference. "Propagation of radio waves"*. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University. 2021. P. 596–600. (in Russian)
6. Patent for the utility model RUS219610U1 dated 27.07.2023. Georadar transmitter. *Gorkin D.S., Sakhterov V.I.* (in Russian)
7. *Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Lyakhov G.A., Reznikov A.E.* Deep georadiolocation. *Journal of Radioelectronics*. 2019. № 4. P. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6. (in Russian)
8. *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)
9. *Sakhterov V.I.* Investigation of the propagation of decimeter radio waves on a mid-latitude route using broadband signals: dis. ... candidate of Physical and Mathematical Sciences. IZMIRAN. Troitsk. 2005. 111 p. (in Russian)
10. *Panin A.V., Baryshnikov G.Ya., Nikiforov K.E.* The use of GPR "Python-3" to study the "Giant ripples of the current" in the Altai Mountains. *Collection of scientific articles of the III International Scientific and Practical Conference "The use of digital learning tools and robotics in general and vocational education: experience, problems, prospects"*. Barnaul: Altai State University. 2017. P. 99–104. (in Russian)
11. *Sakhterov V.I.* Measuring characteristics of GPR antennas. *Abstracts of the I Russian Scientific Conference "Radiophysics, photonics and investigation of the properties of matter"*. Omsk: Omsk Scientific Research Institute of Instrument Engineering. 2020. P. 50–51. (in Russian)
12. Patent for the utility model RUS218691U1 dated 06.06.2023. Georadar for radar sensing of the underlying surface. *Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I.* (in Russian)

13. Certificate of state registration of the computer program № 2023663673 dated 27.06.2023. Computer program: MATRIX. *Gorkin D.S., Varenkov V.V.*

Information about the authors

Aleksandr A. Averin – Engineer
Dmitiy S. Gorkin – Leading Engineer
Vladimir V. Varenkov – Research Scientist
Vladimir I. Sakhterov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 17.03.2024

Approved after reviewing 23.04.2024

Accepted for publication 26.05.2024

ЖУРНАЛ «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Главный редактор: академик РАН *Александр Степанович Бугаев*

Международный научно-технический журнал, состоящий из научно-технических обзоров и статей по наиболее актуальным направлениям радиотехники и электроники.

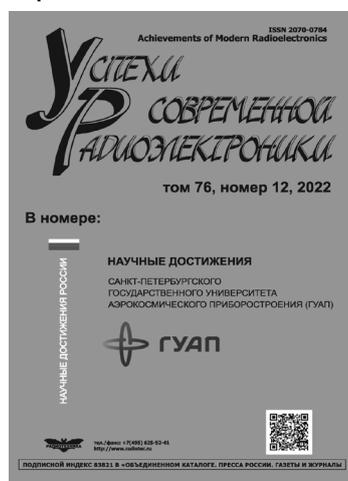
Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 1947 г.

ISSN 2070-0784

Периодичность – 12 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83821



Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика
- 1.2.4. Кибербезопасность
- 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовые устройства
- 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)
- 2.2.5. Приборы навигации
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.7. Фотоника
- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры
- 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 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

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

107031, г. Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,
тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru