

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396.969.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ЗЕМЛИ НАНОСЕКУНДНЫМ ГЕОЛОКАТОРОМ ПЕРЕДНЕГО ОБЗОРА

Пармёнов Андрей Михайлович

специалист по разработке нелинейного радиолокатора, подповерхностного георадара переднего обзора; инженер 1 категории АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»¹.

E-mail: 2910477@mail.ru.

Кошелев Александр Игоревич

аспирант кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского»²; инженер АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»¹.

E-mail: aleks220993@yandex.ru.

Бархоткин Александр Александрович

аспирант кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского»²; инженер АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»¹.

E-mail: shura.barhotkin@yandex.ru.

¹Адрес: 603009, г. Нижний Новгород, ул. Героя Шапошникова, 5.

²Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Аннотация: В данной статье при теоретическом исследовании рассмотрен вопрос распространения электромагнитной волны вдоль плоской границы раздела двух сред, численно решена задача Зоммерфельда и рассчитана функция ослабления. Произведён выбор поляризации зондирующего сигнала геолокатора переднего обзора. Промоделировано поле рассеяния объекта, заглублённого в грунт и находящегося на земле, при наклонном падении электромагнитной волны из воздушного пространства. Проведена оценка энергетического потенциала и вычислена пороговая дальность обнаружения геолокатора переднего обзора с использованием в уравнении дальности радиолокации в качестве поправки исследованной функции ослабления. В ходе экспериментального исследования собран макет геолокатора переднего обзора и проведены опыты по обнаружению мины ТМ-62М пробным макетом локатора. Выявлены основные недостатки передающей системы и показана потенциальная возможность геолокатора переднего обзора по обнаружению малоразмерных взрывоопасных объектов на фоне земной поверхности.

Ключевые слова: задача Зоммерфельда, геолокатор переднего обзора, функция ослабления, основное уравнение дальности радиолокации, СВЧ-компрессор.

Введение

В настоящее время ведутся работы по созданию средств борьбы с минами и самодельными взрывными устройствами (СВУ). В связи с развитием новых видов мин и типов взрывателей существует актуальная проблема создания но-

вых более эффективных и безопасных методов обнаружения малоразмерных взрывоопасных объектов. Необходимость создания геолокатора переднего обзора обусловлена сложностью обнаружения мин и взрывоопасных устройств уже существующими методами.

Геолокатор переднего обзора реализует наклонное сканирование границы раздела двух сред и дистанционное обнаружение малоразмерных объектов в грунте или на его поверхности на фоне контраста, что обеспечивает безопасность личного состава. Использование широкополосных зондирующих сигналов увеличивает разрешающую способность и уменьшает слепую зону обнаружения.

Исследования по применению геолокаторов для обнаружения мин проводятся уже более 30 лет [1–3]. В основном исследуются радиолокационные системы с сигналом видеоимпульсного и непрерывного типа, непрерывного излучения с частотной модуляцией или со ступенчатым изменением частоты [4].

Среди наземных систем переднего обзора существует единственная известная разработка фирмы Jausog, которая может обнаруживать и идентифицировать типы мин на удалении до 30 м с низкой вероятностью ложных тревог. Она может также обнаруживать заглублённые в грунт мины. В данном проекте геолокатор со ступенчато изменяющейся частотой сигнала, излучаемого через три рупорные антенны, монтировался на автомобиле типа Hummer.

На разработку технических средств по обнаружению мин затрачиваются значительные ресурсы. Но проблема гуманитарного разминирования далека от оптимального решения. Поэтому разработка широкополосного геолокатора переднего обзора является достаточно актуальной темой.

Теоретическое исследование по

возможности обнаружения геолокатором

Для теоретического исследования дистанционного обнаружения мин с помощью геолокатора необходимо составить электродинамическую модель точечного излучателя, приподнятого над границей раздела двух сред, который зондирует нижнее полупространство с находящейся в нём моделью мины. Далее нужно найти поле рассеяния от данной неоднородности в точке наблюдения. Такая электродинамическая задача решалась в программе FEKO [5, 6], но

конечного результата получить не удалось в связи с функциональными ограничениями вычислительной системы, что потребовало максимально допустимых упрощений.

Сначала численными методами был найден интеграл Зоммерфельда по комплексной кривой. Потенциал поля был рассчитан методом плоских неоднородных волн [7], что позволило изучить вопрос излучения точечного вертикального диполя, приподнятого на высоту $z_s = 3,5$ м, в верхнем полупространстве.

Комплексная диэлектрическая проницаемость определялась как

$$\varepsilon = \varepsilon' + i \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0},$$

где ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon' = 10$);

σ – проводимость среды ($\sigma = 0,005$ См/м);

f – частота излучения ($f = 815$ МГц);

ε_0 – диэлектрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Найденное решение сравнивалось с полем суперпозиции сферических волн от прямого и зеркального источника. Результатом сравнения оказалось полное соответствие расчётов интеграла Зоммерфельда с отражательной формулой [8]. Этот факт позволяет использовать лучевое приближение в дальнейших оценках.

Известно, что невозможно разложить сферическую волну на плоские однородные волны. Поэтому поле плоской волны подбиралось таким образом, чтобы в окрестности неоднородности оно повторяло поле точечного источника. Таким образом, поле сферической волны от прямого источника заменялось полем плоской волны (рис. 1). В итоге максимальные упрощения начальной задачи привели к задаче, когда в качестве источника излучения мины используется плоская вертикально поляризованная волна. С вычислительной точки зрения такая задача является гораздо более простой.

С помощью упрощенной электродинамической модели в программе FEKO удалось найти поле рассеяния и была рассчитана эффективная площадь рассеяния (ЭПР) заглублённой в

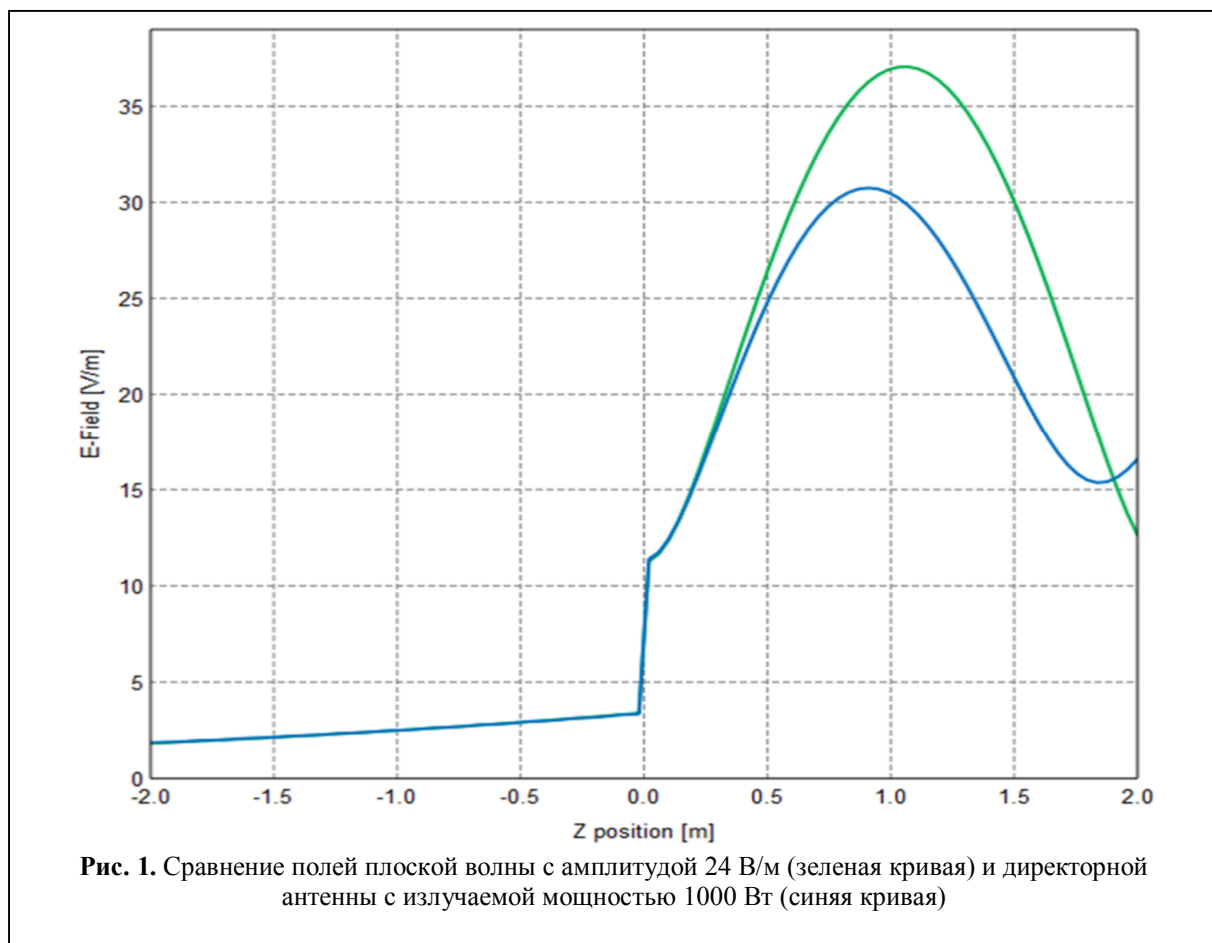


Рис. 1. Сравнение полей плоской волны с амплитудой 24 В/м (зеленая кривая) и директорной антенны с излучаемой мощностью 1000 Вт (синяя кривая)

грунт на 20 см мины ТМ-62М, представляемой в виде проводящего цилиндра высотой 11 см и диаметром 32 см, на который под различными углами падала плоская вертикально поляризованная волна. Подстилающая поверхность представлялась в виде диэлектрической среды в нижнем полупространстве с диэлектрической проницаемостью ϵ , проводимостью σ и плотностью ρ . Данная модель представлена на рис. 2, где синей стрелкой указано направление плоской электромагнитной волны, стрелкой красного цвета указан вектор поляризации.

В результате моделирования ЭПР объекта при малых углах зондирования составила $\sigma = 10^{-3} \text{ м}^2$. В этом состоит главная трудность построения наклонного локатора. Так как обнаружение ведется на фоне контраста, малейшие посторонние неоднородности затрудняют обнаружение. Кроме того, крайне негативно влияют наземные объекты, многократно превышающие указанную ЭПР.

Так же было получено значение ЭПР для другой потенциальной цели локатора – наземной мины ТМ-83. В модели в качестве мины использовалась совокупность из двух проводящих цилиндров (рис. 3). Первый с радиусом 19 см и высотой 16 см имитирует саму мину, а второй с радиусом 5 см и высотой 26 см и без оснований имитирует металлический корпус оптического датчика цели. На эту цель в заданном диапазоне углов падала плоская электромагнитная волна с частотой 815 МГц и вертикальной поляризацией.

В результате моделирования рассеянного поля получается совокупность значений, нормированных в величине ЭПР. Данные значения представлены на рис. 4, из которого видно, что при наблюдении мины ТМ-83 под углом места 88 градусов, соответствующее дальности ~ 100 метров, при подъёме антенны на высоту 3,5 метра, её ЭПР почти на всем диапазоне углов $\sigma = 0,06 \text{ м}^2$.

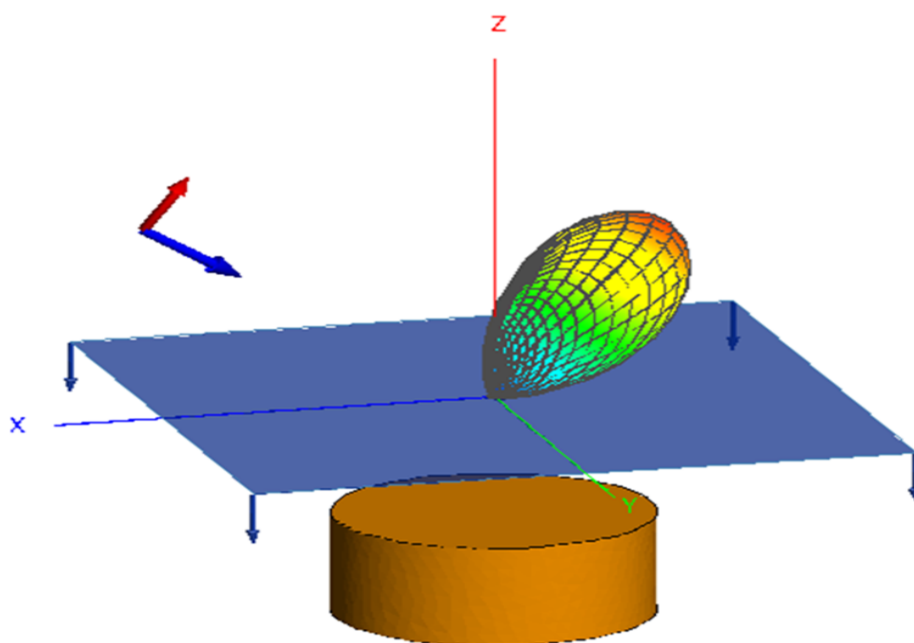


Рис. 2. Модель мины ТМ-62М. 3D-вид рассеянного поля.

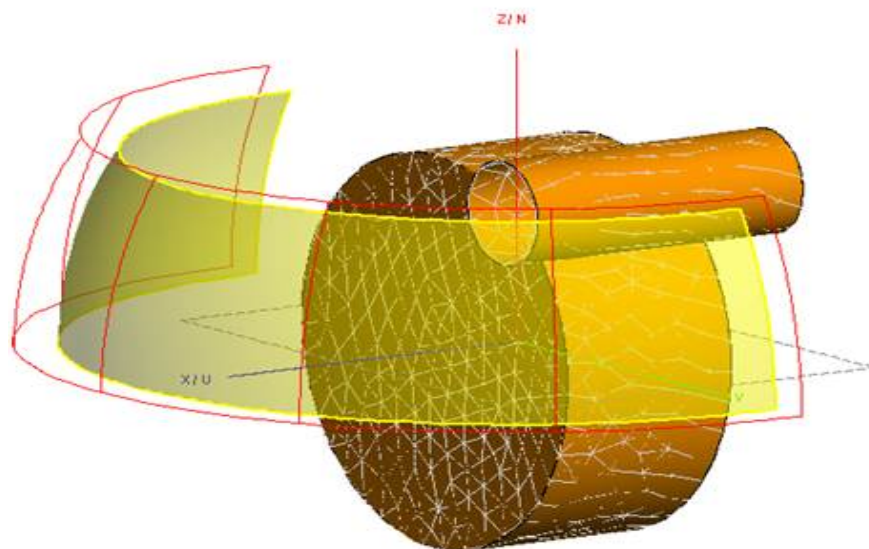


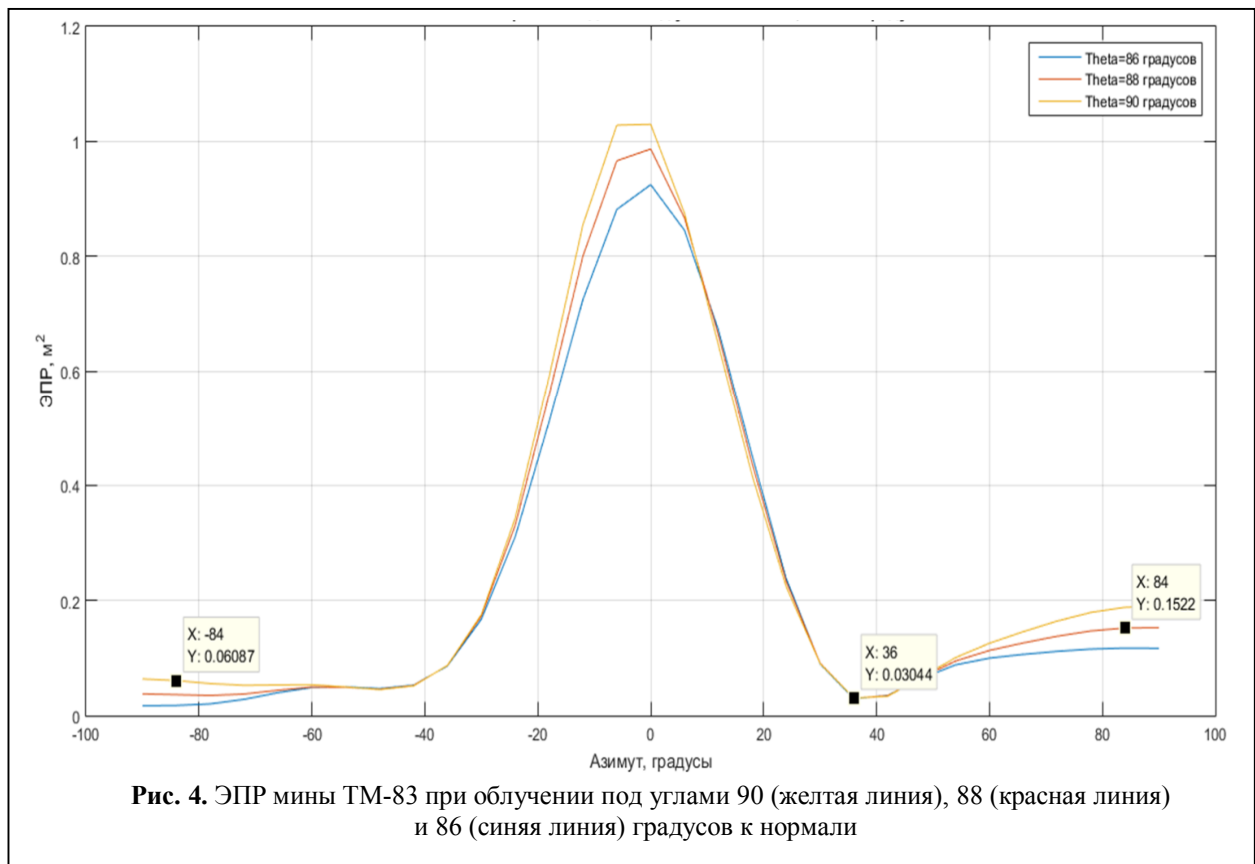
Рис. 3. Модель мины ТМ-83. Жёлтым сектором отмечен диапазон углов, в которых происходит измерение рассеянного поля, а красным – диапазон углов, с которых на модель падает плоская электромагнитная волна.

Далее приводится результат сравнения электродинамического моделирования для вертикального и горизонтального диполей, который оправдывает выбор вертикальной поляризованной плоской волны для расчёта поля рассеяния мины (рис. 5). Как видно из данного сравнения, при переходе из верхнего полупространства в нижнее поле вертикального диполя претерпевает скачок, обусловленный гранич-

ными условиями для нормальной компоненты напряжённости электрического поля [7]:

$$E_{2n} = \frac{E_{1n}}{\epsilon_2}, \quad (2)$$

где E_{1n} – нормальная компонента напряжённости электрического поля в верхнем полупространстве; E_{2n} – нормальная компонента напряжённости электрического поля в нижнем



полупространстве; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость нижнего полупространства.

При этом тангенциальные компоненты электрического поля непрерывны на границе раздела двух сред. Казалось бы, выбор горизонтальной поляризации выгоден, но факт того, что амплитуда вертикального диполя в нижнем полупространстве больше амплитуды горизонтального диполя, делает использование вертикальной поляризации более предпочтительной для зондирования заглублённых объектов.

Все дальнейшие теоретические исследования строились вокруг некой аппаратной реализации, основным компонентом которой является формирователь зондирующего сигнала – СВЧ компрессор [9–11]. Данное устройство разработано в Томском физико-техническом институте, и принцип его работы заключается в "накачке" электромагнитной энергии в резонатор радиоимпульсом длительностью от 1,0 мкс с частотой повторения 5 кГц. Выход резонатора нагружается на затвор, который

управляется рpn-диодами. Так как ширина полосы обратно пропорциональна добротности на выходе, при открытии затвора управляющим импульсом происходит разряд резонатора, в процессе которого формируется широкополосный сигнал с длительностью импульса порядка 5–10 нс и импульсной мощностью порядка 1кВт при мощности сигнала накачки около 100 Вт. Центральная частота сигнала в таком случае составляет 815 МГц и полоса порядка 200 МГц.

Как правило, у локоаторов приёмная и передающая антенны расположены на одном полотне. В случае ближней локации они должны быть разнесены, чтобы прямой сигнал с передающей антенны не попадал в приёмную. Антенны на передачу и приём идентичны. Расчёты показывают, что функция ослабления [8] тем меньше, чем меньше высота подъёма. Для практического применения геолокатора разумной представляется высота $z_s = 3,5$ м, что даёт возможность перемещаться локоатору по дорогам общего пользования.

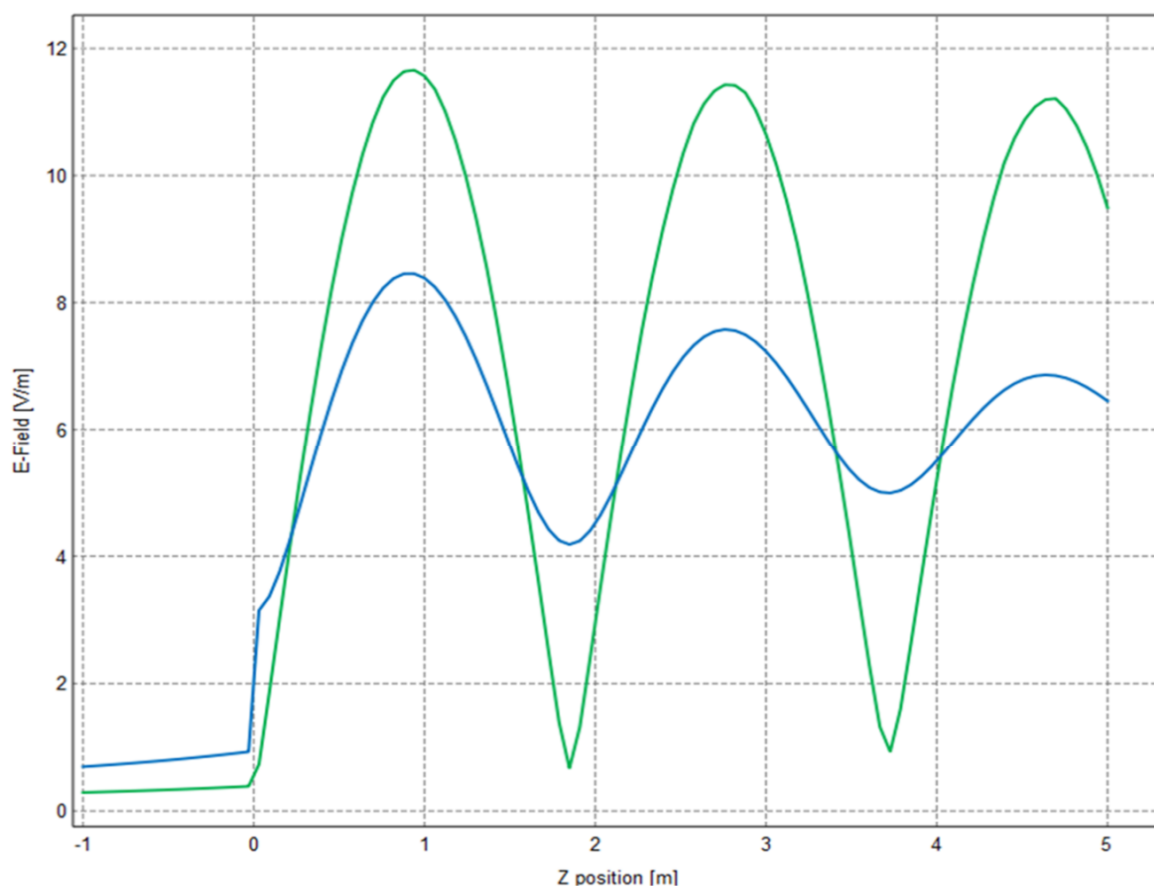


Рис. 5. Поля вертикального диполя (синяя линия) и горизонтального диполя (зеленая линия) при $x = 35$ м, $z_s = 3,5$ м (x – дальность обнаружения, z_s – высота подъема диполей, z – точка наблюдения)



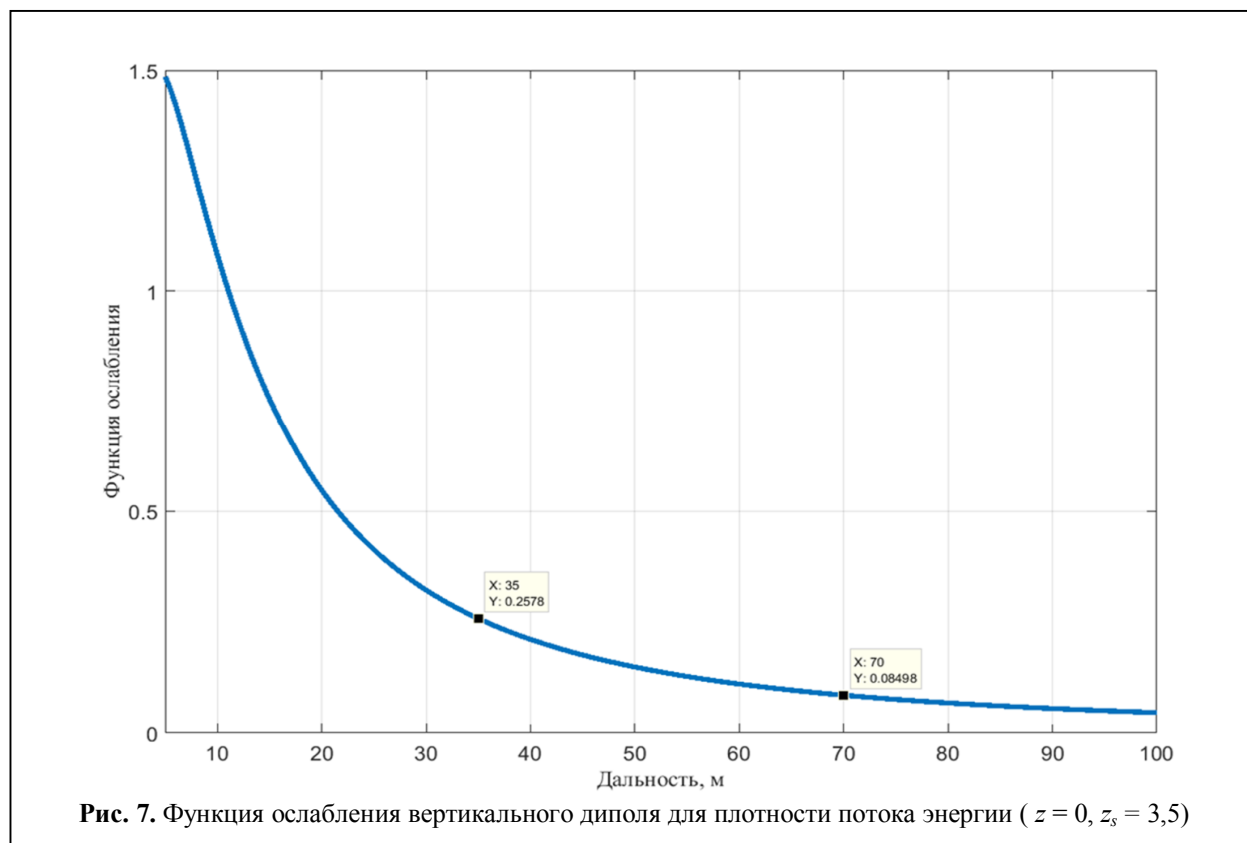
Рис. 6. Структурная схема геолокатора переднего обзора

Во всем остальном структура геолокатора мало чем отличается от локатора с приёмником прямого усиления (рис. 6).

Для оценки энергетического потенциала геолокатора использовалось основное уравнение дальности радиолокации с учетом функции ослабления, которая показывает, как отличается поле излучателя в присутствии подсти-

лающей поверхности по сравнению со свободным пространством. Численное решение задачи Зоммерфельда позволило рассчитать данную функцию и использовать её для исследования энергетического потенциала локатора (рис. 7).

Вычисление пороговой дальности обнаружения производилось по следующей формуле:



$$P_r = \left[\frac{P_{\text{имп}} \cdot w(R)^2 \cdot G}{4\pi R^2} \right] \cdot \left[\frac{\sigma \cdot w(R)^2}{4\pi R^2} \right] \cdot \frac{G\lambda^2}{4\pi},$$

где P_r – мощность, принятая антенной; $P_{\text{имп}}$ – импульсная мощность, излучённая антенной; $w(R)$ – функция ослабления; R – дальность обнаружения; σ – ЭПР объекта обнаружения; G – коэффициент усиления антенны; λ – длина волны.

При этом мощность, принятая антенной, берётся равной пороговой чувствительности приёмника. Она напрямую зависит от уровня собственных шумов и полосы пропускания приёмника. Для полосы 200 МГц пороговая чувствительность составила $-113,8$ дБВт. В качестве антенной системы выбрана антенная решетка с 12 полуволновыми вибраторами.

Коэффициент усиления данной антенной системы составил 17 дБ. В таблице 1 приведены значения параметров, использованные при расчете максимальной дальности обнаружения геолокатором на основе компрессора СВЧ-импульсов заглублённой в грунт мины ТМ-62М.

На рис. 8 представлено решение уравнения (3). Как видно из рис. 8, точка пересечения пороговой чувствительности приёмника с мощностью в приёмной антенне находится в точке $x = 94,5$ м. Таким образом, максимальная дальность обнаружения геолокатора на основе СВЧ-компрессора с заданными параметрами заглублённой в землю мины, составляет $R_{\text{max}} = 94,5$ м.

Таблица 1. Параметры геолокатора для оценки энергетического потенциала

Пороговая чувствительность приёмника, дБВт	Импульсная мощность сигнала, Вт	ЭПР мины, м ²	Коэффициент усиления антенны, дБ	Длина волны, м
-13,8	10 ³	10 ⁻³	17	0,36

Таблица 2. Предельные дальности обнаружения для различных целей

Объект поиска	ЭПР, м ²	Предельная дальность обнаружения, м
Мина ТМ-62М	0,001	94,5
Мина ТМ-83	0,06	175
Угловый отражатель	32	386

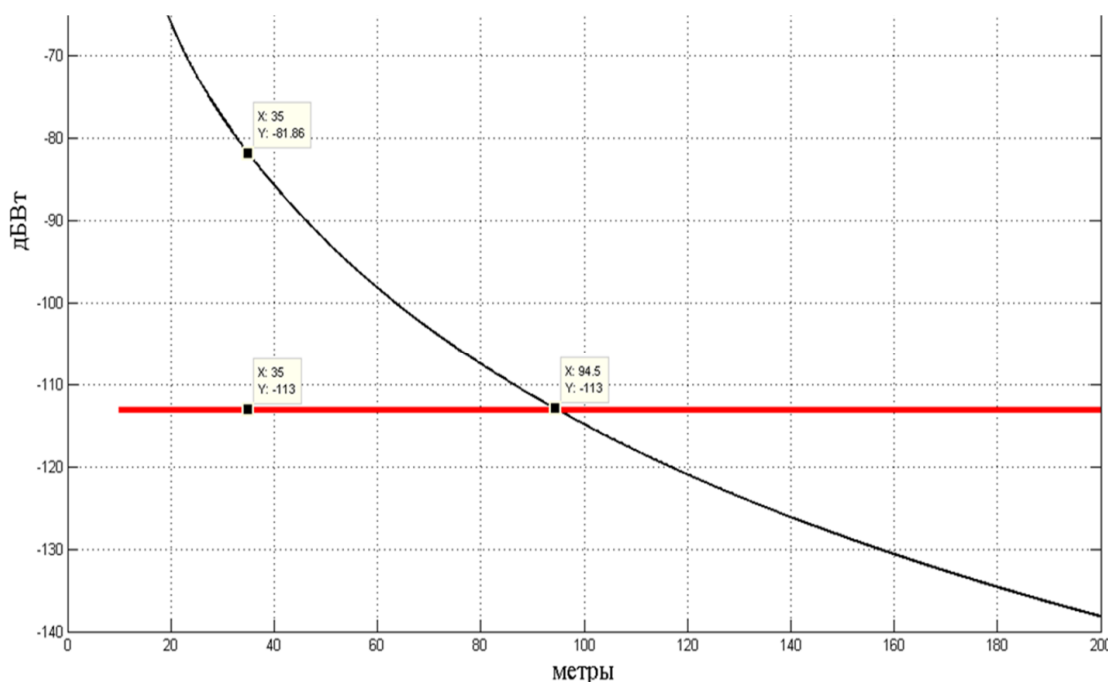


Рис. 8. Решение уравнения дальности радиолокации для геолокатора на основе СВЧ-компрессора (чёрная кривая – мощность в приёмной антенне для плоской границы раздела двух сред, красная кривая – пороговая чувствительность приёмника)

Также были получены аналогичные зависимости для мины ТМ-83 и треугольного углового отражателя с ребром 1,2 м. Результаты расчёта предельной дальности обнаружения для целей с различным ЭПР представлены в таблице 2.

Экспериментальное исследование по возможности обнаружения мины макетом геолокатора

Для экспериментальной проверки геолокатора по возможности обнаружения мины в настоящее время реализуется макет с указанными параметрами. Ведутся работы по созданию антенной решётки и приёмника прямого усиления. Некоторые результаты были получены для антенн с коэффициентом усиления 10 дБ и приёмником с пороговой чувствительностью – 50 дБм. В результате опытов удалось обнаружить мину ТМ-62М, обращённую верхней проекцией к антенне на расстоянии 25 м (рис. 9).

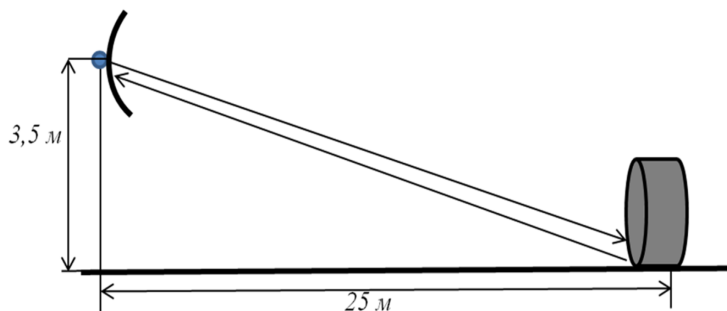


Рис. 9. Зондирование мины, обращённой верхней проекцией к антенне

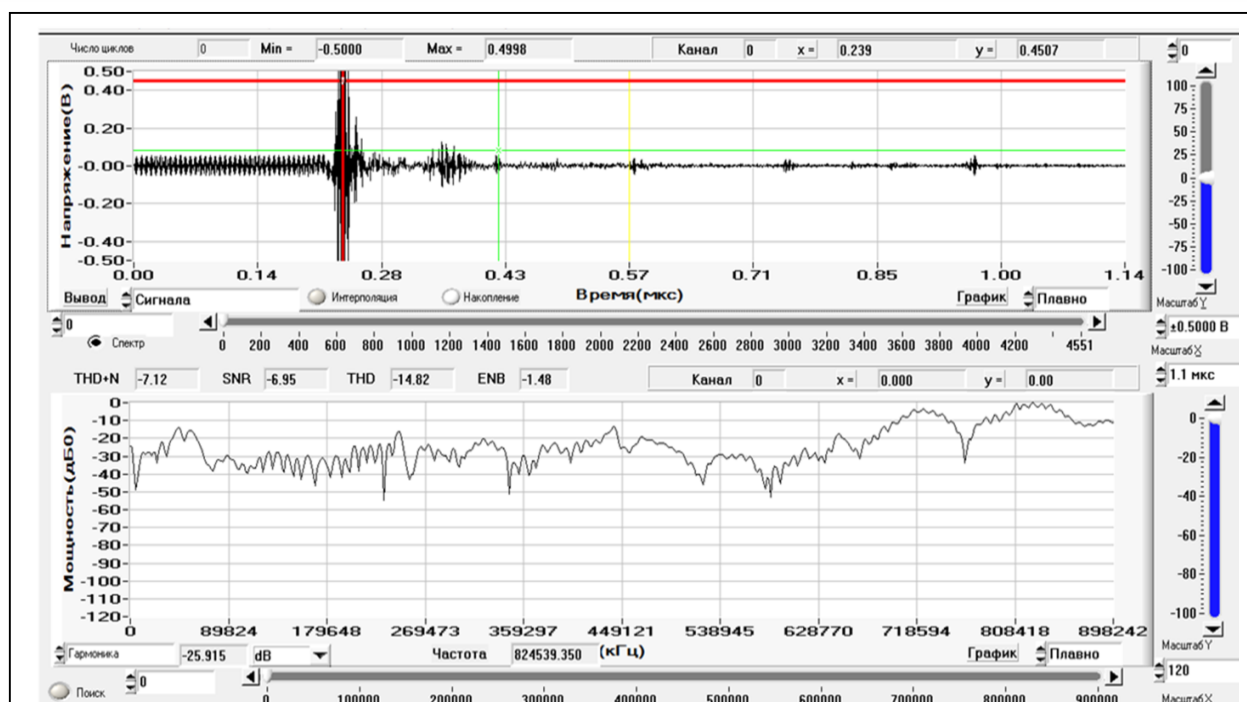


Рис. 10. Регистрация принятого сигнала

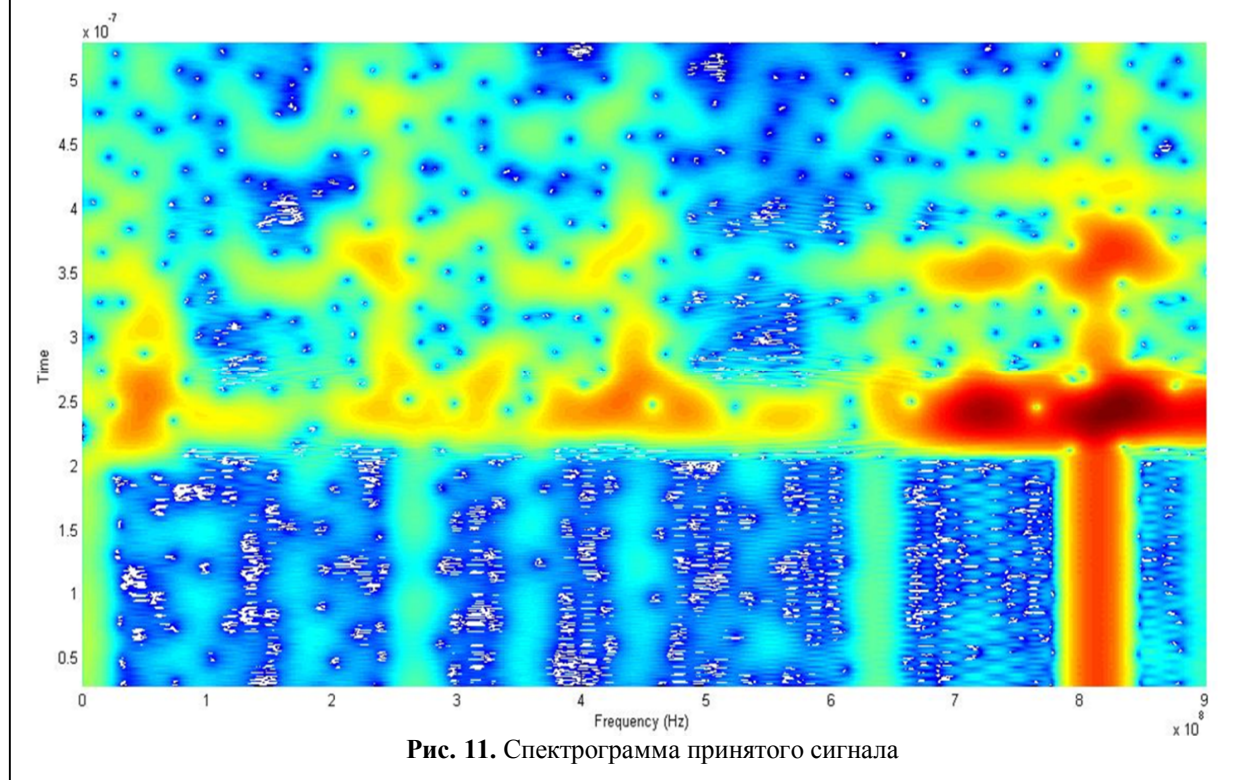
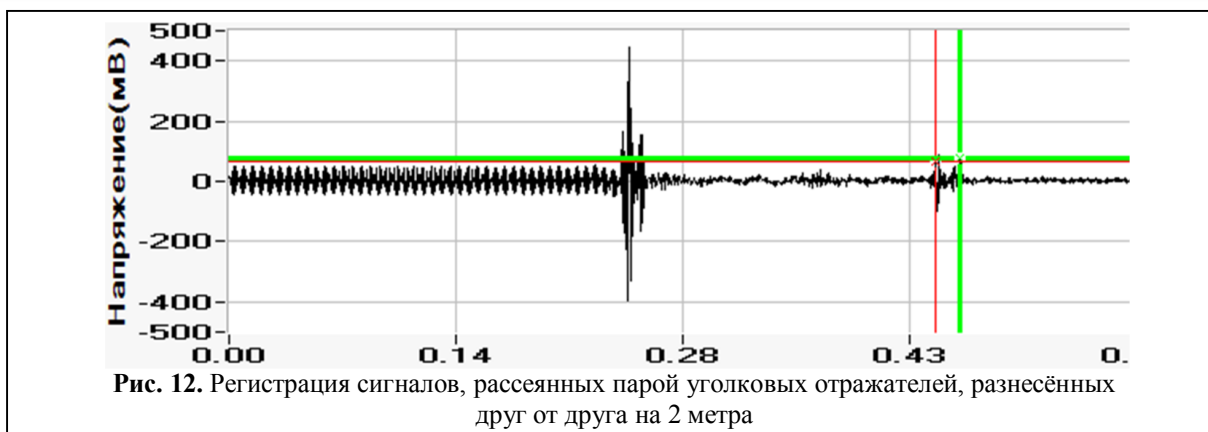


Рис. 11. Спектрограмма принятого сигнала

Ниже представлены регистрация (рис. 10) и спектрограмма [12] (рис. 11), соответствующие опыту, когда была обнаружена мина. На рис. 10 и рис. 11 присутствуют следующие сигналы: зондирующий (красный маркер) на отметке 0,24 мкс; сигнал, отражённый от мины

(зелёный маркер), на отметке 0,41 мкс. Задержка отражённого от мины сигнала относительно опорного сигнала составляет 0,18 мкс, что равно дальности 25 м.

В ходе экспериментов с макетом радиолокатора также была исследована разрешающая



способность получившейся системы. В итоге удалось различить два уголковых отражателя на дистанции 35 метров от антенн и 2 метра друг от друга. На антенную систему при этом подавался сигнал с компрессора, и на компьютере наблюдались отражённые целями сигналы (рис. 12).

На представленной регистрации видны принятые сигналы, среди которых сигнал прямого прохождения с передающей антенны на приёмную (0,24 мкс), а так же сигналы отражённые от уголковых отражателей (отмечены красным и зеленым маркерами).

Таким образом, разрешающая способность геолокатора переднего обзора, в основе передающей системы которого СВЧ-компрессор, составляет ~2 м.

Данные опыты позволили выявить основные недостатки передающей системы и показать потенциальную возможность геолокатора с имеющейся аппаратной основой. На рис. 10 слева от сжатого сигнала наблюдается гармонический квазинепрерывный сигнал накачки, который проходит на выход СВЧ компрессора с ослаблением 17 дБ. Данный сигнал, испытывая множественные переотражения от местных предметов, попадает в приёмный тракт и усложняет приём сигнала в окрестности частоты сигнала накачки компрессора 815,8 МГц. Также приём отражённого сигнала от объектов с большим ЭПР может превысить динамический диапазон приёмника и ввести его в режим ограничения мощности. Решением данной проблемы может стать фильтрация несущей час-

тоты в канале приёмника, клапанирование и диодные ограничители. При этом уход от центральной частоты влево или вправо снижает энергетический потенциал геолокатора.

Заключение

Целью исследования являлась оценка возможности обнаружения малоразмерных взрывоопасных объектов с помощью наносекундного геолокатора переднего обзора. Изучен вопрос распространения ЭМВ вдоль плоской границы раздела 2-х сред, численно решена задача Зоммерфельда, рассчитано ЭПР и поле рассеяния объектов на фоне земли. Проведена оценка энергетического потенциала геолокатора и рассчитана теоретическая максимальная дальность его обнаружения с учётом влияния земной поверхности.

Проведено экспериментальное исследование, в результате которого удалось дистанционно на расстоянии 25 м обнаружить мину, обращённую верхней проекцией к антенне. Выявлены основные недостатки передающей системы и направления дальнейшего развития.

На основании полученных в данной исследовательской работе результатов, можно сделать вывод о перспективности построения широкополосного (наносекундного) геолокатора переднего обзора для обнаружения мин и СВУ. При этом необходимо продолжить работы по устранению основных недостатков и проведению экспериментов с аппаратурой, характеристики которой использовались при теоретических расчётах.

Литература

1. World's Fastest Solid-State Digitizer. – Energy & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, California, UCRL-52000-94-4.1994. Pp. 1–6.
2. Micropower Impulse Radar. – Science & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, California, UCRL-52000-96-1/2. 1996. Pp. 16–29.
3. Azevedo S.G. et al. Statement of Capabilities: Micropower Impulse Radar Technology Applied to Mine Detection and Imaging. – Lawrence Livermore National Laboratory, California, UCRL-ID-120801. March 1995.
4. Гринев А.Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью ФЕКО. М. : ЗАО «НПП РОДНИК», 2008. 246 с.
6. Блажис Ю.П., Паслен В.В. Решение задач электродинамического моделирования в дисциплине «Поля и волны». 2007. С. 11–12.
7. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: АН СССР, 1961. 497 с.
8. Гавриленко В.Г., Яшинов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. 148 с.
9. Yushkov Yu.G., Badulin N.N., Batsula A.P., Mel'nikov A.I., Novikov S.A., Razin S.V., Shoshin E.L. A Nanosecond Pulse-compression Microwave radar // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. 1997. Vol. 2. No. 6. Pp. 71–76.
10. Богданович Б.Ю., Каминский В.И., Сеньюков В.А. Системы высокочастотного питания линейных ускорителей электронов с накоплением энергии СВЧ поля : учебное пособие. М. : МИФИ, 2002. 96 с.
11. Манько А.Н., Слинко В.Н., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Установка с резонансной импульсной компрессией для получения мощных сверхвысокочастотных импульсов двухсантиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 3. С. 1–4.
12. Tektronix, Основы анализа спектра в реальном масштабе времени : начальное руководство [Электронный ресурс]. С. 6–7. URL: <http://www.tektronix.com/rsa> (дата обращения 23.03.2018).

Поступила 23 марта 2018 г.

English

FEASIBILITY STUDY OF THE OBJECT DETECTION BY THE FORWARD-LOOKING NANOSECOND GEOLOCATOR AGAINST THE EARTH BACKGROUND

Parmenov Andrey Mikhaylovich – Developer of Non-linear Radar, Subsurface Forward-looking Georadar; 1st Category Engineer. JSC Federal Scientific and Production Centre “Nizhny Novgorod Radio Engineering Research Institute”¹. *E-mail*: 2910477@mail.ru.

Koshelev Alexander Igorevich – Graduate Student, Radio Engineering Department, National Research State University of Nizhny Novgorod named after N.I. Lobachevsky²; Engineer, JSC Federal Scientific and Production Centre “Nizhny Novgorod Radio Engineering Research Institute”¹. *E-mail*: alexs220993@yandex.ru.

Barkhotkin Alexander Aleksandrovich – Graduate Student, Radio Engineering Department, National Research State University of Nizhny Novgorod named after N.I. Lobachevsky²; Engineer, JSC Federal Scientific and Production Centre “Nizhny Novgorod Radio Engineering Research Institute”¹. *E-mail*: shura.barhotkin@yandex.ru.

¹Address: 603009, Nizhny Novgorod, Shaposhnikov St., 5.

²Address: 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

Abstract: Currently, the problem of safe explosive hazards detection is very pressing for several reasons. First, the majority of the existing detection methods implement scanning in the vertical direction, thereby putting the operator at unjustified risk. Secondly, there is quite a number of the remote action explosive hazards, such as horizontal action and top attack mines with a penetrator core and approaching to which at the distance less than hundred meters is also an unjustified risk. The article gives capability assessment of small-sized object detection inside the ground and on its surface by the forward-looking geolocator based on the microwave compressor. Sommerfeld integral was found for the solution of the task in hand through numerical methods which enabled to obtain the attenuation function of interfacial barrier imitating the ground surface. RCS (radar cross

section) values of such search subjects as buried mine TM-62M and horizontal action mine TM-83 were obtained also through FEKO program. The geolocator's optimum parameters were obtained based on the microwave compressor's parameters (the center frequency is 815 MHz and the frequency range is 200 MHz) and the compressor acting as the probing signal generator. Further on, the assessment of energy potential of the radar on detection of the search subjects of interest was made through the obtained parameters using the calculated attenuation function. That said the obtained detection ranges were 94.5 meters for buried mine TM-62M and 175 meters for mine TM-83 located on the ground surface that is reasonable from the point of detection safety. The experimental research of the geolocator's model was done due to lack of the optimal receiving device and antenna system for detection of small-sized explosive hazards against the background of the land surface; as a result of this research it became possible to detect remotely mine TM-62M facing the antenna with its top at 25 meters distance. The model's shortcomings are identified and some requirements to ground-penetrating radar components are specified based on the obtained results.

Keywords: Sommerfeld theory, forward-looking geolocator, attenuation function, radar detection range basic equation, microwave compressor.

References

1. World's Fastest Solid-State Digitizer. – Energy & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, California, 1994. UCRL-52000-94-4. Pp. 1–6.
2. Micropower Impulse Radar. – Science & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, California, 1996. UCRL-52000-96-1/2. Pp. 16–29.
3. *Azevedo S.G.* et al. Statement of Capabilities: Micropower Impulse Radar Technology Applied to Mine Detection and Imaging. Lawrence Livermore National Laboratory, California, March 1995. UCRL-ID-120801.
4. *Grynev A.Yu.* On the radar ground penetration. M. : Radiotekhnika. 2005. 416 p.
5. *Bankov S.E., Kurushin A.A.* FEKO-based calculation of the radiated structures. M. : CJSC «NPP “RODNIK”», 2008. 245 p.
6. *Blazhis Yu.P., Paslen V.V.* The solution of electrodynamic modeling problems in the academic course "Fields and waves". 2007. Pp. 11–12.
7. *Feynberg E.L.* Radio wave propagation along the ground surface. M. : Academy of Sciences of the USSR. 1961. 497 p.
8. *Gavrilenko V.G., Yashnov V.A.* Distribution of radio waves in the modern systems of mobile communication, Nizhny Novgorod : NNSU, 2003. 148 p.
9. *Yushkov Yu.G., Badulin N.N., Batsula A.P., Mel'nikov A.I., Novikov S.A., Razin S.V., Shoshin E.L.* A Nanosecond Pulse-compression Microwave radar // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. 1997. Vol. 2. No. 6. Pp. 71–76.
10. *Bogdanovich B.Yu., Kaminsky V.I., Senyukov V.A.* The high-frequency power supply systems of electron linear accelerators with microwave field energy accumulation. Textbook. M. : MEPhI, 2002. 96 p.
11. *Manko A.N., Slinko V.N., Chumerin P.Yu., Yushkov Yu.G.* Assembly with a resonant pulse compression for obtaining powerful superhigh-frequency two-centimetric range impulses. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2004. No. 3. Pp. 1–4.
12. Tektronix, Introduction to spectrum analysis in real time, Basic guide. Pp. 6–7. URL: <http://www.tektronix.com/rsa>.