

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.5>

УДК: 621.396.96; 537.871

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИПОЛЬНОЙ АНТЕННЫ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ СРЕД

И.В. Прокопович

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, 108840, Москва, г. Троицк, Калужское ш., 4

Статья поступила в редакцию 21 мая 2024 г.

Аннотация. В работе разбирается задача численного моделирования импульсного излучения дипольной антенны, лежащей на границе раздела воздуха и диэлектрической среды. Приводится краткое описание возможностей моделирования методом конечных разностей во временной области, реализованных в программном пакете grgMax. Для контроля полученных численных результатов приведено их сопоставление с известными аналитическими решениями двумерных задач излучения бесконечно длинной линии с током, лежащей на границе раздела двух сред, рассматривается диаграмма направленности как в частотной, так и во временной области. Показано, что аналитическое и численное решение при подсчете диаграммы направленности импульсного излучения дают эквивалентные результаты. Отмечены недостатки численного подхода, который хорошо справляется с расчетами в ближней зоне, а оценки сигнала в дальней зоне могут потребовать чрезмерных вычислительных, в том числе временных, ресурсов даже для относительно простой двумерной задачи. Также численно рассчитаны трехмерные диаграммы направленности импульсного излучения конечной дипольной антенны в ближней зоне. Полученные результаты можно

использовать в практике георадиолокации для выбора схемы проведения георадарной съемки. Примерам расчета ослабления сигнала по формуле радиолокации с учетом численно подсчитанных диаграмм направленности посвящен последний раздел работы.

Ключевые слова: георадар, grgMax, дипольная антенна, диаграмма направленности, формула радиолокации, глубина зондирования.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00083.

Автор для переписки: Прокопович Игорь Валерьевич, prokop@izmiran.ru

Введение

Анализ публикаций показывает, что в последнее десятилетия в разы возрос интерес к использованию георадара в различных областях, требующих неразрушающего контроля, таких как:

- 1) выполнение космических миссий по изучению Луны и планет;
- 2) разведка полезных ископаемых;
- 3) сопровождение строительства зданий, инженерных сооружений, дорог, трубопроводов;
- 4) геофизическое обследование при археологических раскопках и поиске исторических объектов;
- 5) решение задач гуманитарного разминирования;
- 6) экологический мониторинг техногенных загрязнений почвы;
- 7) определение влажности и глубины оттаивания почв для наблюдения за климатическими изменениями и др.

Такое внимание к георадиолокации естественным образом должно сопровождаться дальнейшим развитием аппаратуры георадаров, усложнением схем проведения полевой съемки и улучшением методов обработки полученных данных. В данной работе рассматриваются некоторые проблемы расчета диаграммы направленности (ДН) излучения дипольной антенны георадара и проистекающие из них особенности проведения подповерхностной съемки.

Представления о том, как энергия электромагнитного поля передается и принимается конкретной антенной, могут быть полезными для проектирования и использования георадарных антенн, а также для улучшения методов обработки сигналов, таких как миграция и решение обратной задачи. Основной характеристикой излучения любой антенны является форма ее ДН. Однако, для георадарных антенн крайне важно изучить помимо влияния основных параметров антенны на ДН еще и ее зависимость от окружающих условий, в которых происходит георадарная съемка [1]. Это связано с тем, что между антенной и подстилающей средой имеется взаимное влияние, которое заметно меняет излучающие свойства антенны. В практике георадиолокации хорошо себя зарекомендовали дипольные антенны с распределенной резистивной нагрузкой, возрастающей к концам антенны по закону Ву-Кинга [2], такие антенны позволяют минимизировать паразитный «звон» зондирующего импульса и получать достаточно четкие радарограммы. Экспериментальные измерения направленных свойств таких дипольных антенн георадара приведены в работах [3,4]. Двухмерная (2D) задача аналитического расчета монохроматического излучения бесконечно длинной антенны, лежащей на границе раздела воздуха и диэлектрической среды была решена в работе [5]. Такую модель из-за симметрии задачи вполне можно принять за 2D приближение излучения дипольной антенны. ДН интенсивности излучения для этой модели приведена на рис. 1а – было показано, что основная мощность излучения направлена в среду с большим показателем диэлектрической проницаемости ε , при этом отношение плотности потока энергии вниз (в среду) к плотности потока энергии вверх (в воздух) равно n^2 , где $n = \sqrt{\varepsilon}$ – показатель преломления. Также в нижнем полупространстве выделяются два главных лепестка ДН, направление максимумов которых совпадает с критическим углом полного внутреннего отражения $\theta = \arcsin(1/n)$. В работе [6] была аналитически решена подобная 2D задача излучения дипольной антенны во временной области, когда антенна возбуждается известным импульсом тока. В этом случае скорее правильно говорить о временных снимках распределения

излучения в пространстве, чем о ДН, но для наглядности результатов возможно построение ДН по максимуму амплитуды полной волновой формы сигнала, принятого на некотором удалении от излучающей антенны. В качестве относительной единицы измерения расстояния для наблюдений l естественно выбрать ее равной характерной длине импульса, $l = c/f$, где f – центральная частота возбуждающего импульса тока, c – скорость света. Результаты построения таких ДН для ближней зоны, на расстоянии l , и дальней зоны, на расстоянии $50l$, приведены на рис. 1б,в. Видно что ДН в ближней зоне (рис. 1б) уже в целом отвечает основным особенностям, отмеченным для гармонического излучения, только слегка отличается распределение энергии излучения в верхнее и нижнее полупространство, а главные лепестки отстоят чуть под большим углом к нормали границы раздела. В дальней зоне (рис. 1в) ДН завершает свое формирование и становится похожей на случай излучения в частотной области. Конечно, задача импульсного излучения в ближней зоне является более приближенной к реалиям георадиолокации, где чаще всего большинство отражений от объектов происходит на расстояниях $1-10l$, но тем не менее диаграмму направленности для монохроматического излучения можно использовать для более грубых инженерных оценок. Далее в численном эксперименте будет проверен приведенный результат аналитической теории импульсного возбуждения дипольной антенны, а затем он будет сопоставлен с более реалистичной моделью трехмерного (3D) излучения конечной дипольной антенны, лежащего на границе раздела сред.

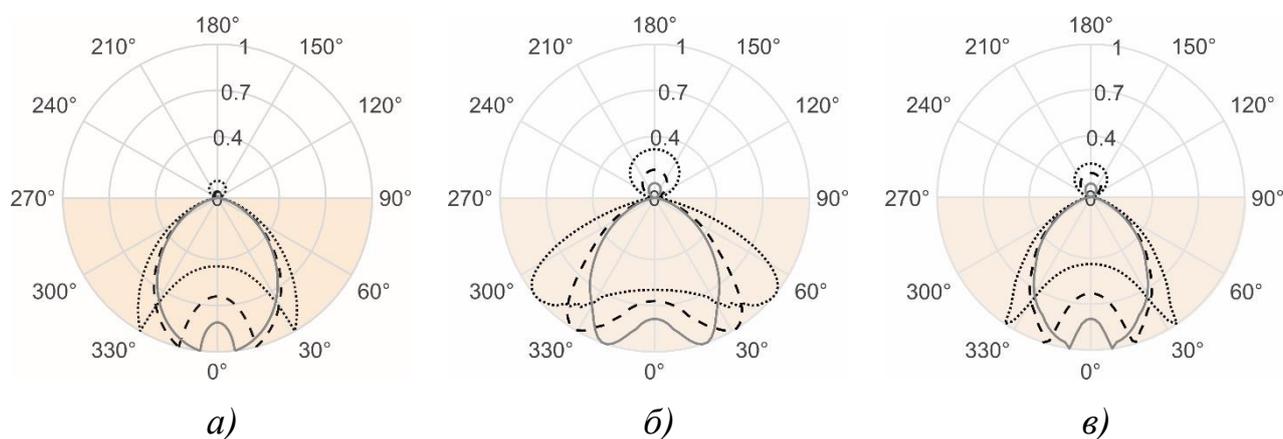


Рис. 1. Диаграммы направленности аналитической 2D задачи излучения бесконечной дипольной антенны на границе двух сред: гармонический источник (а); импульсное излучение с приемом сигнала на расстоянии l (б) и $50l$ (в) от источника. Стиль линий соответствует различным значениям $n=2$ (\cdots); 4 ($- - -$); 9 ($—$).

1. Описание среды численного моделирования

В качестве основного инструмента численного моделирования георадарного зондирования подповерхностной среды в данной работе использовался `grMax` — программное обеспечение с открытым исходным кодом, которое позволяет решать уравнения Максвелла в трехмерном пространстве с использованием метода конечных разностей во временной области (анг. FDTD method) [7]. Разработка `grMax` началась еще в середине 90х и к настоящему времени данный программный продукт стал полноценным инструментом моделирования распространения электромагнитного излучения в подповерхностных средах и завоевал обширную группу пользователей, исследователей в области георадиолокации. Данный численный пакет позволяет решать задачи со сложной геометрией изучаемых объектов, электромагнитные свойства которых можно задавать как через фиксированные параметры, так и через коэффициенты нескольких дисперсионных моделей, также `grMax` предоставляет большие возможности управления излучающей системой, можно выстраивать сложные модели антенн и задавать в них возбуждающий импульс тока. После установки программного пакета на персональном компьютере для запуска расчета необходимо создать входной файл, в котором через специальные команды задаются параметры расчетной области, геометрия объектов, свойства

материалов и определяются характеристики источника излучения. Выходной файл, помимо прочего, также поддерживает грамматику языка программирования Python, благодаря чему можно, например, через циклы описать сложные плавные переходы между несколькими средами или выбрать необходимые точки приема электромагнитного излучения. Следует отметить, что данный программный пакет довольно требователен к объему оперативной памяти при моделировании трехмерных задач, но порой рассматриваемая задача позволяет обходить эти ограничения через проведение более быстрых и простых двумерных расчётов, в которых двумерная расчетная сетка выбирается толщиной в одну расчетную ячейку Δy [8]. Завершенный расчет представляет собой выходной файл, содержащий в себе волновые формы всех составляющих электромагнитного поля в выбранных точках наблюдения, такой файл позволяет проводить постобработку полученных данных в любой удобной среде программирования; в данной работе для последующих расчетов и визуализации результатов использовался программный пакет Matlab. Также через объединение группы выходных файлов для разных положений передающей и приемной антенны можно строить модельные радарограммы прохода приемно-передающей системы над изучаемым объектом. Применения `gprMax` и подобных ему программ является довольно эффективным и относительно быстрым способом анализа рассматриваемых радиофизических явлений для целей георадиолокации.

2. Результаты численного эксперимента

2.1. 2D модель излучения дипольной антенны

На первом этапе численного эксперимента была проведена проверка аналитического результата импульсного возбуждения бесконечно длинной антенны лежащей на границе раздела сред, описанного во введении. Расчет проводился с шагом разбиения расчетной области $\Delta x = 0.01$ м, а шаг по времени был скорректирован через параметр устойчивости (`#time_step_stability_factor`) равный 0.9. В качестве излучающего источника взят диполь Герца

(‘#hertzian_dipole’) размещенный поперек плоскости расчета, в таком случае излучение диполя Герца эквивалентно излучению бесконечной линии с током. Для волновой формы возбуждающего импульса тока была выбрана первая производная функции Гаусса (‘gaussiandot’) $I(t) = -4\pi^2 f^2 (t - f^{-1}) \exp(-2\pi^2 f^2 (t - f^{-1})^2)$, где f – центральная частота импульса.

На рис. 2а приведена 2D ДН рассчитанная на расстоянии длины импульса l по максимуму амплитуды полной волновой формы сигнала, аналогично тому как это описано в введении. Полученный результат эквивалентен аналитической ДН (рис. 1б). Можно отметить, что времена расчета принятого сигнала с приведенными выше параметрами в ближней области вполне небольшие и сопоставимы с временем численных операций с аналитическими функциями для решения из работы [6].

Из-за ограничений имеющейся вычислительной аппаратуры реализовать расчеты 2D ДН в дальней области ($\sim 50l$) не удалось, пришлось ограничиться переходной зоной ($10l$). Результаты расчета 2D импульсной ДН на расстоянии $10l$ приведены на рис. 2б – подтверждается тенденция выстраивания максимумов главных лепестков вдоль углов полного внутреннего отражения. Для среды с показателем преломления $n = 9$ решение на таких расстояниях стало расходящимся и для этого случая пришлось подбирать новый оптимальный шаг расчетной сетки для стабилизации решения – рис. 3в. Следует отметить, что время расчета для переходной зоны ($10l$) увеличилось на порядки, что демонстрирует преимущество аналитического подхода при решении этой задачи, когда времена на численные операции с аналитическими функциями для расчета поля на разных расстояниях остаются сопоставимыми. Даже эта относительно простая численная задача требует значительных вычислительных ресурсов.

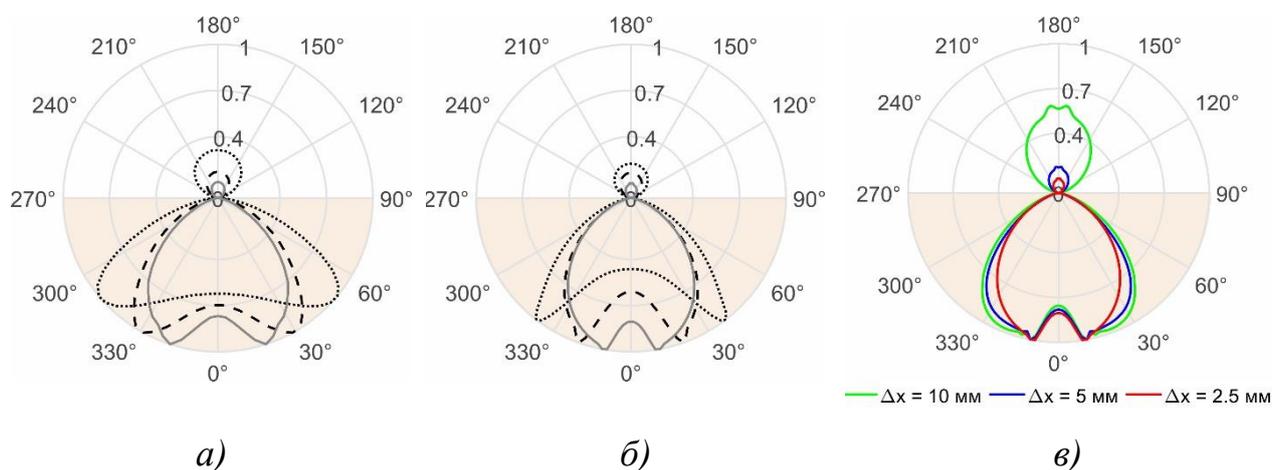


Рис. 2. Диаграммы направленности, рассчитанная в среде grgMax для задачи импульсного излучения дипольной антенны на границе двух сред: 2D модель с приемом сигнала на расстоянии l (а) и $10l$ (б) от источника; (в) – сходимость решения в зависимости от шага расчетной сетки Δx для случая $n=9$. Стиль линий соответствует различным значениям $n=2$ (\cdots); 4 ($- - -$); 9 ($—$).

2.2. 3D модель излучения дипольной антенны

В данной работе при 3D моделировании ДН импульсного излучения дипольной антенны рассматривалась только основная продольная компонента напряженности электрического поля E_x , направленная вдоль диполя. Расчет выполнялся со следующими параметрами: шаг расчетной сетки $\Delta x = 0.005$ м; источник возбуждения – передающая линия (`#transmission_line`) с волновым сопротивлением 150 Ом; волновая форма возбуждающего импульса – первая производная функции Гаусса (`gaussiantdot`) с центральной частотой 300 МГц; в качестве излучающих плеч диполя использовались полосы размером 0.04×0.25 м из абсолютно проводящего материала (`pec`).

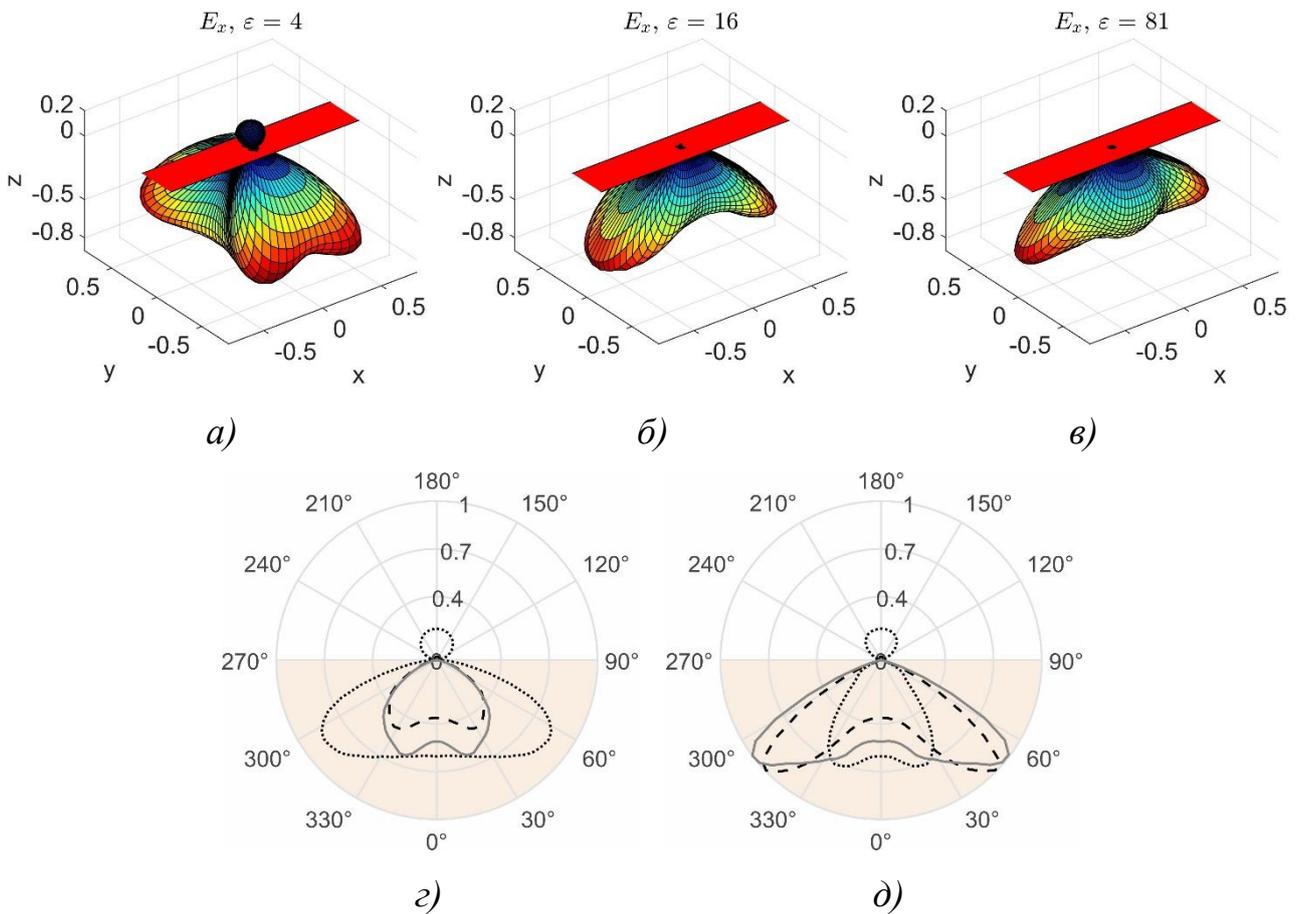


Рис. 3. 3D модель излучения с приемом сигнала на расстоянии l для разных значений n : 3D диаграммы направленности (а, б, в), ДН в Н-плоскости (г) и ДН в Е-плоскости (д). Красной полосой условно показано положение дипольной антенны.

Результаты 3D моделирования для ближней зоны приведены на рис. 3. Максимальное значение амплитуды поля для всех 3D ДН нормировано на единицу. Видно, что ДН имеют сложную конфигурацию, значительно меняющиеся от выбора значения показателя преломления n – для $n = 2$ четыре главных лепестка ДН направлены почти поперек дипольной антенны, а для $n = 4$ и 9 формируется только два главных лепестка вытянутых вдоль диполя. На рис. 3г построен срез ДН в Н-плоскости (плоскости перпендикулярной к диполю), а на рис. 3д построен срез ДН в Е-плоскости (плоскости проходящей через среднюю линию диполя и нормаль к границе раздела сред). Форма ДН в Н-плоскости довольно узнаваема по результатам рассмотренных 2D задач – сохраняется тенденция сближения главных лепестков с увеличением показателя преломления подповерхностной среды.

Для ДН в Е-плоскости наблюдается обратная закономерность – главные лепестки отклоняются друг от друга (приближаясь к диполю) при увеличении показателя преломления n .

Далее были сделаны расчеты ДН на немного большем расстоянии $1.6l$ (предельном для вычислительных ресурсов имеющегося персонального компьютера), чтобы отследить закономерности изменения ДН с увеличением дистанции (рис. 4г). В сравнении с результатами рис. 3 наблюдаются некоторые незначительные изменения в распределении интенсивности излучения ДН, для $n=2$ в Е-плоскости теперь наблюдается только один главный лепесток, а в Н-плоскости главные лепестки сузились и стали более направленными. Для $n=4$ и 9 в целом ДН сохраняют свою форму. Также для сопоставления направленных свойств антенны, находящейся в разных условиях, для ДН были рассчитаны коэффициенты направленного действия (КНД) (рис. 4е,ж). Можно отметить, что максимальные значения КНД антенны лежат в диапазоне 6–8 дБ: для $n=2$ антенна преимущественно излучает поперек антенны (6 дБ), КНД в Е-плоскости – 4 дБ; для $n=4$ и 9 излучение распределяется в основном в продольном направлении (8 дБ), а в Н-плоскости КНД принимает значения 5–6 дБ.

В статье [9] разобраны результаты 3D моделирования FDTD методом импульсного излучения дипольных антенн в приближении излучения диполя Герца, авторы показывают направленные свойства диполя в Е- и Н- плоскостях, показывают динамику изменения ДН от ближней до дальней зоны, делают сравнение с экспериментальными данными. Примеры 3D расчета в программном пакете grMax ДН излучения дипольной антенны «бабочки» в присутствии сложных гетерогенных сред можно найти в работе [1].

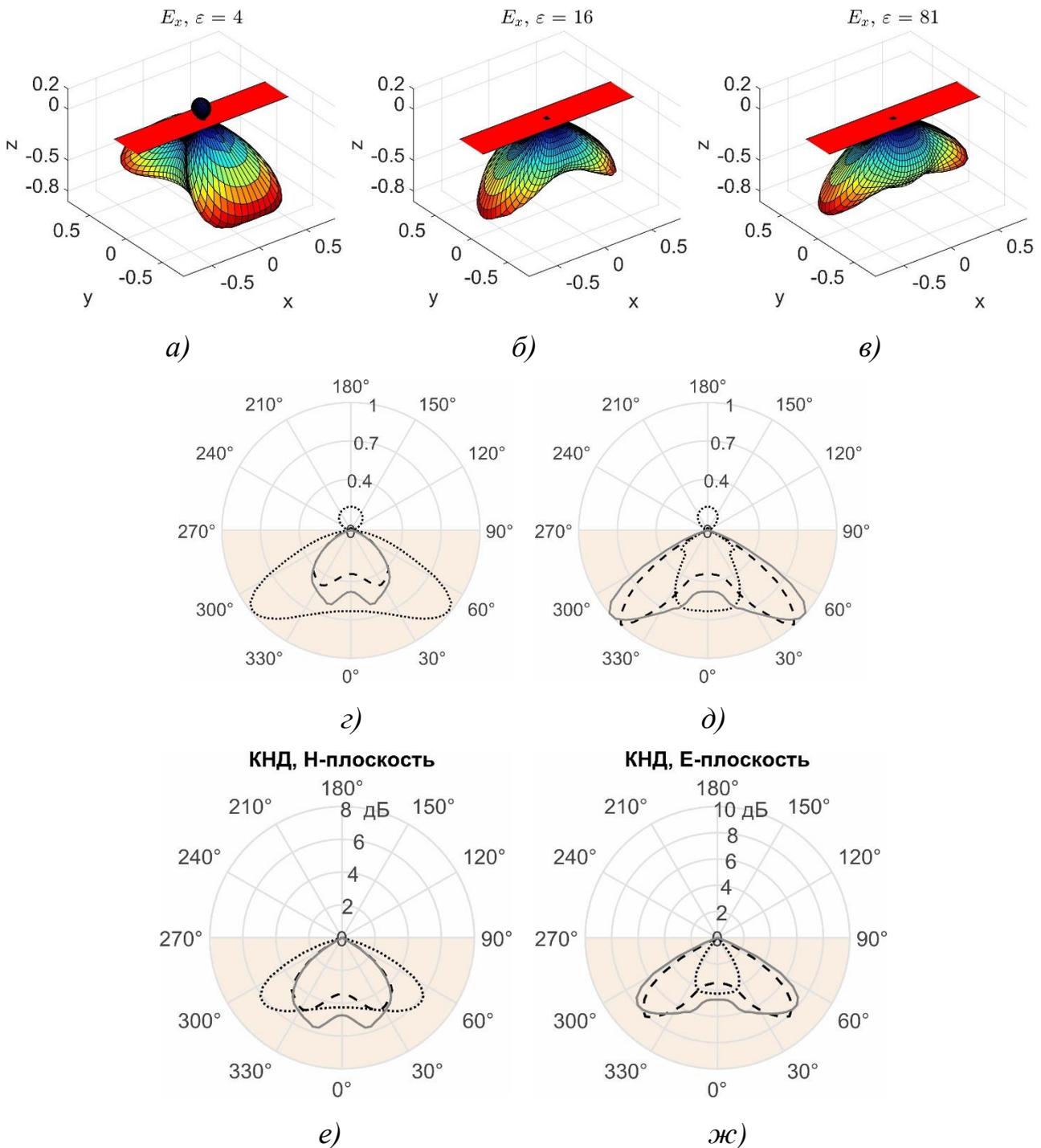


Рис. 4. 3D модель излучения с приемом сигнала на расстоянии $1.6l$ для разных значений n : 3D диаграммы направленности (а, б, в); ДН в Н-плоскости (г); ДН в Е-плоскости (д); КНД в Н-плоскости (е) и КНД в Е-плоскости (ж). Красной полосой условно показано положение дипольной антенны.

3. Оценка ослабления сигнала при подповерхностной радиолокации

Используя результаты 3D численного моделирования ДН излучения дипольной антенны можно провести грубую оценку энергетических потерь при распространении сигнала при подповерхностном радиозондировании через

формулу радиолокации для монохроматического сигнала [10-13]. В приведенных работах рассмотрение формулы радиолокации для подповерхностного излучения не проводится в полной мере, как раз из-за отсутствия каких-либо данных об ДН антенн, лежащих на границе раздела сред, и ограничивается анализом ослабления сигнала из-за расходимости волны и оценкой диссипативных потерь [10,13,14]. Более строгие оценки энергетического потенциала георадара должны принимать во внимание КНД излучающей и приемной антенны, как это сделано ниже.

В качестве модельного примера рассмотрим зондирование двуслойной подстилающей поверхности, когда среды в ней отличаются своими характеристиками диэлектрической проницаемости $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ и проводимости (σ_1, σ_2) , а задача георадарного обследования сводится к обнаружению отражения от границы между этими двумя средами. Такие задачи в практике встречаются довольно часто – мониторинг качества дорожного покрытия, зондирование дна водоемов, обследование границы сезонно-талого слоя в регионах вечной мерзлоты и т.д. В данной ситуации ослабление сигнала георадара q определяется формулой радиолокации следующего вида:

$$q = \frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \Gamma_{\perp}^2 e^{-2 \frac{\sigma_1}{2c\sqrt{\varepsilon_1}} R}, \quad (1)$$

здесь P_t , P_r мощность излученного и принятого сигналов; первый множитель учитывает направленность излучающей антенны через КНД G_t и расходимость фронта вдоль трассы $R = 2\sqrt{0,25L^2 + h^2}$, L – разнос между приемной и передающей антеннами, h – глубина залегания границы раздела сред; второй множитель отвечает за прием сигнала антенной с КНД G_r ; третий множитель описывает ослабление на границе раздела плоских сред для нормальной к плоскости падения составляющей электрической напряженности поля E_x ,

где $\Gamma_{\perp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2}$ – коэффициент отражения для поляризации поля

перпендикулярной плоскости падения (формула в приближении плоской волны), углы удовлетворяют закону Снеллиуса $\sqrt{\varepsilon_1} \sin \theta_1 = \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2$; четвертый множитель отвечает за диссипативное ослабление сигнала $q_d = e^{-\frac{\sigma_1}{2c\sqrt{\varepsilon_1}}r}$ вдоль оптического пути, проходящего в верхней среде с проводимостью $\sigma_1 = \omega\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1$, где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, $\omega = 2\pi f$, f – частота сигнала.

Таблица. Электрические параметры сред для $f = 50$ и 150 МГц.

Материал	ε	$\operatorname{tg} \delta$	$\sigma, \text{с}^{-1}$	$q_d, \text{дБ/м}$ (50 МГц)	$q_d, \text{дБ/м}$ (150 МГц)
песок, влажность 0%	2.55	0.004	$0.10 \cdot 10^8$	0.03	0.1
песок, влажность 15%	11.58	0.087	$9.50 \cdot 10^8$	1.35	4.0
суглинок, влажность 0%	2.82	0.018	$0.48 \cdot 10^8$	0.14	0.4
суглинок, влажность 15%	11.13	0.09	$9.44 \cdot 10^8$	1.37	4.1

Разберем несколько возможных примеров расчета ослабления сигнала при зондировании двуслойной песчаной среды – случай, когда влажный слой толщиной h лежит на сухом основании, и другой противоположный случай, когда, например, равномерный слой сухого песка покрывает влажный грунт. Электрические параметры сухого и влажного песка и суглинка, типичных для нашего региона подповерхностных сред, которые при увеличении влажности меняют свои параметры в сторону увеличения как диэлектрической проницаемости, так и проводимости, приведены в таблице, см. [10,15]. Из-за схожести параметров песка и суглинка ограничимся рассмотрением только песчаных сред. Также для расчётов были выбраны две типичные центральные частоты зондирующих импульсов, применяемых на практике, – 50 и 150 МГц. Для приведенных оценок используются численные расчеты КНД двух одинаковых излучающей и приемной дипольных антенн описанных в параграфе 2.2. Результаты расчетов семейств кривых ослабления сигнала в зависимости от расстояния между передающей и приемной антеннами для нескольких различных вариантов порядка и глубины залегания двух подповерхностных слоев приведены на рис. 5. Первый широко известный

результат – это меньшее ослабление низкочастотных волн и, следовательно, возможность с их помощью исследовать более глубокое строение среды. Далее, можно заметить, что из-за эффекта «фокусировки» диаграмм направленности антенной системы во влажных средах с большим ε можно ожидать в ряде случаев ($f = 50 \text{ МГц}$, $h = 1\text{--}2 \text{ м}$) более высокий принятый сигнал нежели в случае сухой верхней среды такой же толщины, несмотря на наличие значительно более сильного затухания во влажных средах, ср. рис. 5а и рис. 5в. Также для случая более оптически плотной верхней среды (рис. 5в,г) на графиках можно заметить перегибы кривых, связанные с критическим углом полного внутреннего отражения между первой и второй средами, которые показывают, что начиная с какого-то расстояния между антеннами зондирующий сигнал почти перестанет проникать во вторую среду. В целом форма кривых ослабления сигнала определяется ДН используемых в георадаре антенн. Уже ранее в работе [16] отмечалось, что в ряде случаев из-за особенностей ДН можно наблюдать повышение амплитуды принятого сигнала при увеличении расстояния между передающей и приемной антеннами, этот факт более детально подтверждается рис. 5. В качестве основного нового результата произведенных расчетов, который важен для практики полевых работ, можно отметить наблюдаемую зависимость максимума принимаемой мощности от расстояния между антеннами – для каждого конкретного случая строения подземной двуслойной среды есть свой оптимальный разнос антенн, при котором принятый сигнал будет более высоким и приведённые в работе рассуждения позволяют сделать оценки такого разноса антенн.

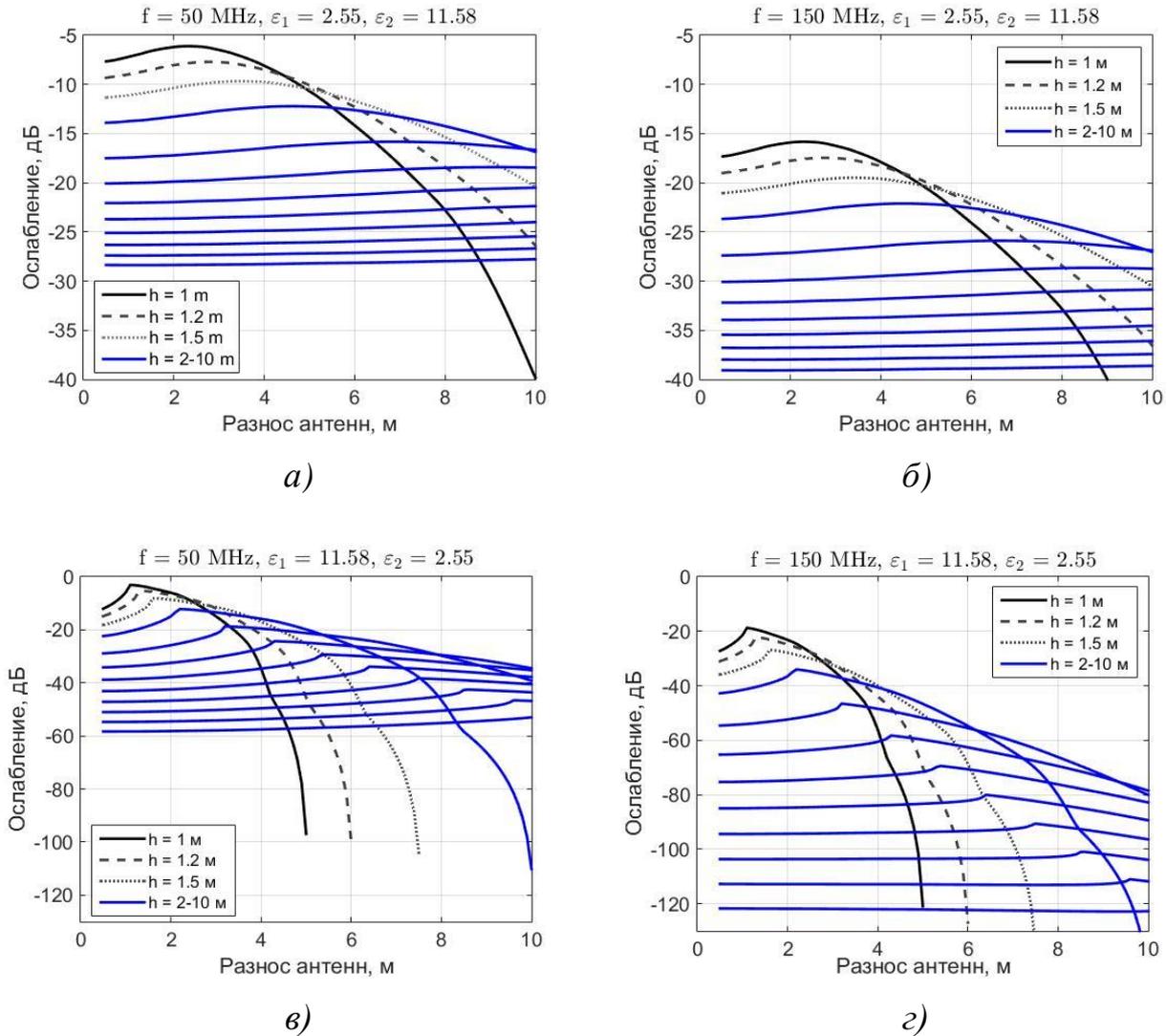


Рис. 5. Ослабление сигнала в зависимости от расстояния между передающей и приемной антеннами, глубины залегания границы раздела двух сред h и порядка расположения слоев: а), в) характерная частота импульса – 50 МГц; б), г) характерная частота импульса – 150 МГц.

В качестве итога можно дать ряд практических рекомендаций. Для зондирования границы влагонасыщенного верхнего слоя лучше выбирать больший разнос между антеннами, который соответствует критическому углу отражения между верхней и нижней средой. Если же стоит задача изучения более глубоко лежащих границ, то расстояние лучше выбрать меньшим. Также для случая влагонасыщенной ($\epsilon \geq 16$) верхней среды можно рекомендовать применение схемы последовательного размещения антенн георадара, но для оценок ослабления сигнала по формуле (1) тогда нужно использовать коэффициент отражения Γ_{\parallel} , соответствующий случаю, когда напряженность

поля лежит в плоскости падения. Для зондирования сред с достаточно сухим верхним слоем лучше ориентироваться на оценки максимума ослабления сигнала и подбирать соответствующее расстояние между антеннами. При исследовании достаточно глубоких слоев влияние ДН нивелируется и выбор схем радиозондирования может определяться практическим удобством съемки.

Заключение

Такой инструмент как программный пакет gprMax для моделирования распространения электромагнитных волн во временной области может быть очень полезен при численных экспериментах для подтверждения интерпретации экспериментальных данных георадиолокации. Результаты 2D моделирования излучения дипольной антенны на границе двух сред с помощью gprMax хорошо согласуются с аналитическими результатами, поэтому выбор подхода моделирования (аналитического или численного) должен происходить исходя из особенностей рассматриваемых задач. Относительно численного моделирования можно отметить трудности связанные с расчетом распределения поля в дальней зоне, требующего больших вычислительных ресурсов. Также пользователь программного пакета всегда должен быть внимателен к выбору параметров расчета, напрямую связанных с сходимостью получаемых численных результатов. 3D моделирование позволяет перейти к более реалистичным оценкам излучения дипольных антенн для целей георадиолокации. Показано, что на основании 3D моделирования, исходя из параметров антенны и свойств подстилающей среды, можно сделать выбор размещения передающей и приемной антенн как по конфигурации (вдоль одной линии или параллельно друг другу) так и оптимальному расстоянию между ними.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00083.

Литература

1. Warren C., Giannopoulos A. Characterisation of a ground penetrating radar antenna in lossless homogeneous and lossy heterogeneous environments // *Signal Processing*. – 2017. – V. 132. – P. 221-226.
2. Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Prokopovich, I.V., Popov A.V. Deep penetration subsurface radar: hardware, results, interpretation // *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. – IEEE, 2017. – P. 1-6.
3. Сахтеров В.И., Аверин А.А., Попов А.В., Прокопович И.В. К расчету антенн импульсного георадара // *Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн*. – 2022. – №. 1. – С. 485-488. <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-485-488>
4. Morozov P., Morozov F., Lazarev M., Bogolyubov L., Popov A. Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions // *Remote Sensing*. – 2023. – V. 15. – No. 23. – P. 5452. <https://doi.org/10.3390/rs15235452>
5. Engheta N., Papas C.H., Elachi C. Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source // *Applied Physics B*. – 1981. – V. 26. – P. 231-238. <https://doi.org/10.1007/BF00692543>
6. Edemsky F., Popov A., Zapunidi S. A time domain model of GPR antenna radiation pattern // *International Journal of Electronics and Telecommunications*. – 2011. – V. 57. – No. 3. – P. 407-411. <http://dx.doi.org/10.2478/v10177-011-0056-1>
7. Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax // *Construction and building materials*. – 2005. – V. 19. – No. 10. – P. 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007>
8. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – 1966. – V. 14. – No. 3. – P. 302-307. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>

9. Radzevicius S.J., Chen C.C., Peters Jr L., Daniels J.J. Near-field dipole radiation dynamics through FDTD modeling // Journal of applied geophysics. – 2003. – V. 52. – No. 2-3. – P. 75-91. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00241-0)
10. Scheers B. Ultra-wideband ground penetrating radar with application to the detection of anti personnel landmines // Royal Military Academy, Brussels. – 2001.
11. Арманд Н.А., Лукин Д.С., Чубинский Н.П. Современные проблемы подповерхностной радиолокации // Сверхширокополосные системы в радиолокации и связи: Конспекты лекций. – Муром: Изд.-пол. центр МИ ВлГУ. – 2003. – С. 92-107.
12. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие // М.: Издательство «Горная книга». – 2008. – 196 с.
13. Дудник А.В. Влияние излучаемой мощности на глубину зондирования в георадиолокации // Разведка и охрана недр. – 2008. – №. 1. – С. 38-40.
14. Беркут А.И., Копейкин В.В., Морозов П.А., Криницкий Л.М., Ульяновцев Н.А., Попов А.В., Прокопович И.В. Глубинный георадар. Исследования геологической структуры подстилающей поверхности. [Электронный ресурс] <https://www.geo-radar.ru/publish/pub8.php>
15. Финкельштейн М.И. Карпухин В.И., Кутаев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация // М.: Радио и связь. – 1994. – 216 с.
16. Prokopovich I., Popov A., Rajewski L., Marciniak M. Application of coupled-wave Wentzel-Kramers-Brillouin approximation to ground penetrating radar // Remote Sensing. – 2018. – V 10. – No. 1. – P. 22. <https://doi.org/10.3390/rs10010022>

Для цитирования:

Прокопович И.В. Численный расчет импульсного излучения дипольной антенны на границе двух сред // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.5>