

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОВИБРАТОРНОЙ ПОДЗЕМНОЙ АНТЕННЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В ДИССИПАТИВНЫХ СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Леонюк А. С.¹, Юртаев А. С.², Исмаил М. М.³

DOI:10.21681/3034-4050-2026-5-83-90

Ключевые слова: численное моделирование, гибридный алгоритм, глобальная оптимизация, электродинамическое ядро, геофизические параметры, защитная конструкция, частотный диапазон, алгоритм роя частиц, эффективность излучения, дифракционные искажения.

Аннотация

Цель: разработка комплексной модели многовibratorной подземной антенны, функционирующей в диссипативных слоистых средах, с учётом реальных геофизических параметров, и создание алгоритма автоматического расчёта габаритов защитных конструкций.

Метод: использован гибридный алгоритм параметрической оптимизации, интегрирующий электродинамическое ядро, реализованное методом конечных разностей во временной области (FDTD), с методом роя частиц (PSO). Расчёты выполнены для частотного диапазона 4–30 МГц с учётом двухслойной модели подстилающего объёма (песок/щебень), параметры которой обоснованы геофизическими данными для района Хомсской впадины.

Результаты: получены оптимальные геометрические параметры антенны, обеспечивающие на частоте 15 МГц коэффициент усиления 4,4 дБи и активное сопротивление 47,2 Ом, что даёт энергетический выигрыш 3,2 дБ по сравнению с эталонным полуволновым диполем. Разработан и верифицирован алгоритм автоматического расчёта размеров пластикового бокса и котлована, основанный на длине волны и оптимизированных размерах антенны.

Научная новизна: впервые предложена комплексная модель, связывающая геофизические данные реального региона с численным электродинамическим моделированием и глобальной оптимизацией; впервые реализован автоматический расчёт защитных конструкций на основе анализа дифракционных искажений в ближней зоне.

Введение

Интерес к антеннам, размещённым на некоторой глубине в диссипативной среде (среде с потерями), сохраняется на протяжении десятилетий. Данные антенны известны достаточно длительное время, их исследованию были посвящены обширные работы отечественных и зарубежных специалистов. Однако эффективность таких антенн остаётся довольно низкой по сравнению с антеннами, расположенными в воздушном пространстве, из-за влияния среды с потерями на их характеристики.

С появлением современных численных методов электродинамики, развитием алгоритмов и программ, основанных на них, встал вопрос о возможности расчёта подземных антенн (ПА) данными методами, хорошо зарекомендовавшими себя при расчётах антенн в свободном пространстве. Численные методы позволяют моделировать излучатели произвольной формы. Нами были найдены решения ряда задач по возможности моделирования ПА методом

конечных элементов (МКЭ) [1] и методом конечных разностей во временной области (FDTD) [2] с использованием искусственно вводимых поглощающих слоёв (PML) [3]. Реализованная возможность применения современных численных методов для расчёта ПА позволила начать работу по исследованию путей увеличения их эффективности без проведения трудоёмких и дорогих экспериментов [4].

В отличие от известных работ, в данной статье особое внимание уделено не только анализу одиночных вибраторов, но и разработке комплексной модели многовibratorной антенны с учётом реальной слоистой структуры подстилающего объёма (на примере района Хомсской впадины) [11]. Кроме того, впервые предложен алгоритм автоматического расчёта габаритов пластикового защитного бокса и котлована, основанный на длине волны и оптимизированных размерах антенны, что позволяет перейти от теоретических исследований к инженерной реализации.

¹ Леонюк Антон Сергеевич, доцент кафедры Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: leonuck@yandex.ru

² Юртаев Антон Сергеевич, адъюнкт кафедры Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ant8720@yandex.ru

³ Исмаил Мохаммад, адъюнкт кафедры Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mohammad.esmaael.2024@gmail.com

1. Геометрическая и физическая модель антенны и окружающей среды

Для увеличения эффективности ПА, закладываемых в грунт с различными электрическими параметрами, целесообразно использовать многовибраторные структуры. В качестве базовой конфигурации выбран горизонтальный симметричный вибратор, дополненный первичными и вторичными ответвлениями. Такая топология позволяет увеличить эффективную длину антенны и перераспределить поверхностные токи, что критически важно для повышения излучательной способности в среде с потерями.

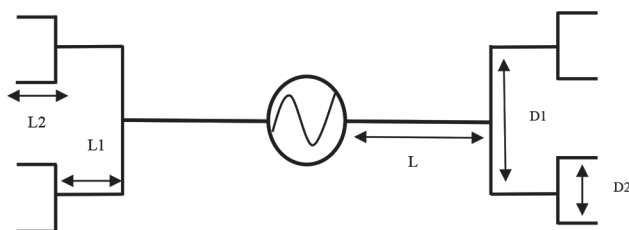


Рис. 1. Схема многовибраторной антенны с обозначениями L , L_1 , L_2 , D_1 , D_2

Независимыми переменными проектирования являются девять параметров:

- L – длина основного диполя (м);
- N_1 , L_1 , D_1 – количество, длина (м) и шаг (м) первичных ответвлений;
- N_2 , L_2 , D_2 – количество, длина (м) и шаг (м) вторичных ответвлений;
- индексы материала (медь, алюминий, серебро, золото, сталь) и покрытия (без покрытия, серебряное, золотое, оловянное).

Параметры слоёв обоснованы результатами численного моделирования и геофизических измерений. В ходе анализа физико-географических условий района Хомсской впадины (Сирия) установлено, что подстилающий объём характеризуется ярко выраженной слоистостью. Для целей электродинамического моделирования принята двухслойная модель (рис. 2):

- Верхний слой (песок): толщина 0,5 м, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{r1} = 4$, удельная проводимость $\sigma_1 = 10^{-4}$ См/м.
- Нижний слой (щебень/гравий): полубесконечный, $\epsilon_{r1} = 5$, $\sigma_2 = 5 \times 10^{-4}$ См/м.

Обоснование выбора модели

Следует отметить, что реальный геологический разрез Хомсской впадины характеризуется значительным разнообразием: помимо песков и гравия, встречаются прослои глин, суглинков, известняков и базальтов. Однако для инженерных расчётов радиотехнических систем общепринятой практикой является использование упрощённых моделей, отражающих усреднённые электрические свойства верхней части разреза. Выбранная двухслойная модель (песок/гравий) является репрезентативной для данного региона, поскольку именно эти породы составляют основную мощность аллювиальных отложений, а их электрические параметры ($\epsilon_r = 4-5$, $\sigma_r = 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$ См/м.) являются наиболее характерными для сухих и полусухих районов Восточного Средиземноморья. Данный подход согласуется с методикой, принятой в работах, где также используются усреднённые модели для расчёта характеристик подземных антенн.

Антенна заглубляется на 0,5 м, располагаясь в верхней части нижнего слоя, вблизи границы раздела.

2. Численное ядро (FDTD) и его верификация

Для решения поставленной задачи использован метод конечных разностей во временной области (FDTD). Данный метод был выбран по следующим причинам: позволяет единообразно обрабатывать как гармонические, так и нестационарные источники; легко реализует поглощающие граничные условия (PML); не требует решения громоздких систем линейных алгебраических уравнений на каждом шаге.

Разработано собственное FDTD-ядро в среде MATLAB. Пространственный шаг сетки $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,1$ м, что обеспечивает не менее 10 ячеек на длину волны в щебне (на

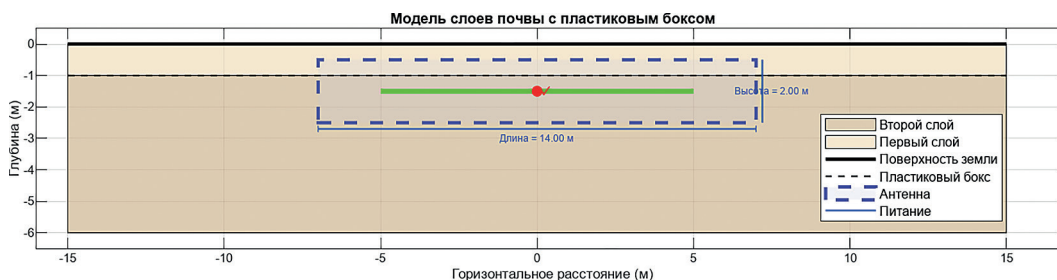


Рис. 2. Двухслойная модель подстилающего объёма

частоте 30 МГц) и гарантирует погрешность численной дисперсии менее 7 %. Временной шаг определяется из условия Куранта – Фридрихса – Леви с коэффициентом запаса 0,95. Для имитации открытого пространства используются 8 слоёв PML с полиномиальным профилем проводимости 4-й степени, обеспечивающим теоретический коэффициент отражения менее 10^{-8} [9].

Возбуждение осуществляется модулированным гауссовым импульсом, что позволяет покрыть требуемый частотный диапазон (4–30 МГц) за один прогон. Расчёт выполняется на 2000 временных шагов до полного затухания переходных процессов.

Верификация. Для проверки достоверности разработанного кода проведён тестовый расчёт полуволнового диполя в свободном пространстве на частоте 15 МГц. Полученные значения входного сопротивления составили $R = 73,1$ Ом и $X = 0,2$ Ом, что с погрешностью менее 1 % соответствует классической аналитической теории [5]. Дополнительная верификация проведена путём сравнения рассчитанного FDTD-ядром значения эффективной диэлектрической проницаемости для трёхслойной среды с аналитическим решением. Расхождение не превысило 2 %.

3. Постановка задачи оптимизации

Задача сформулирована как многокритериальная минимизация отклонений от целевых инженерных параметров:

- Коэффициент усиления: $G_{target} = 12$ дБи (теоретический ориентир).
- Активное сопротивление: $R_{target} = 50$ Ом.
- Реактивное сопротивление: $X_{target} = 0$ Ом.

Целевая функция имеет вид:

$$F = |12 - G_{Calc}| + |50 - R_{Calc}| + |0 - X_{Calc}| + penalty.$$

Для исключения физически нереализуемых конструкций вводятся жёсткие штрафные слагаемые ($Penalty = 1000$) при нарушении соотношений $L_1 > 0,8 \cdot L$ и $L_2 > 0,6 \cdot L$. Выбор частотного диапазона (4, 15, 25, 30 МГц) базируется на анализе множителя ослабления для данного региона.

4. Алгоритмы оптимизации

Для поиска оптимальных параметров антенны использованы два подхода: метод многократного запуска (GMS) и метод роя частиц (PSO).

4.1. Метод многократного запуска (GMS)

Классический подход, включающий генерацию 300 случайных начальных точек в 9-мерном пространстве, запуск локального поиска (метод Хука-Дживса) из каждой точки до сходимости

и выбор точки с минимальным значением F . Основной недостаток – экспоненциальная зависимость покрытия пространства от размерности; 300 точек недостаточно для надёжного исследования гиперкуба, что приводит к частому попаданию в локальные минимумы [7].

4.2. Метод роя частиц (PSO)

Алгоритм роевого интеллекта с параметрами: размер роя – 50 частиц, число поколений – 150, коэффициенты ускорения $c_1 = c_2 = 1,5$, коэффициент инерции ω линейно уменьшается от 0,9 до 0,15. Обновление скорости и положения осуществляется по классическим формулам PSO [6].

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_i^{best} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g_i^{best} - x_i^{(t)});$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}.$$

Целочисленные переменные округляются до ближайшего целого на каждом шаге.

PSO, в отличие от GMS, является методом глобальной оптимизации, не требующим вычисления градиентов и эффективно работающим в многомерных пространствах. Его преимущество в данной задаче заключается в способности избегать локальных минимумов за счёт коллективного поведения роя, что особенно важно при наличии штрафных функций и дискретных переменных.

5. Автоматический расчёт габаритов защитных конструкций

Важной инженерной особенностью предложенной модели является автоматическое определение размеров пластикового бокса и окружающего его котлована. Бокс представляет собой герметичную полую конструкцию из диэлектрика (полиэтилен с $\epsilon_r = 2,3$), заполненную воздухом, что не препятствует распространению электромагнитных волн, но защищает антенну от механических воздействий грунта [8].

5.1. Расчёт размаха антенны

Полный поперечный размах антенны с учётом всех ответвлений:

- по оси X:

$$X_{span} = 2 \cdot (L/2 + L_1 + L_2);$$

- по оси Y:

$$Y_{span} = \max(0,3, (N_1 - 1) \cdot D_1 + (N_2 - 1) \cdot D_2 + 0,1).$$

5.2. Определение технологических зазоров

Величины зазоров выбраны из условия минимизации дифракционных искажений.

Обоснование выбора зазоров d_{box} и d_{pit} .

Выбор величины зазоров является нетривиальной задачей, поскольку слишком малый зазор приводит к ёмкостной связи антенны

с грунтом и искажению диаграммы направленности, а чрезмерно большой – к неоправданному увеличению габаритов котлована.

- зазор антенна–бокс: $d_{box} = \max(\lambda / 20, 0.15)$;
- зазор бокс–котлован: $d_{pit} = \max(\lambda / 12, 0.30)$.

В данной работе зазоры определены из условия минимизации фазовых набегов в ближней зоне. Как показано в для слоистой среды Хомсской впадины, эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эфф}''$ в диапазоне 10–30 МГц имеет значение $|\varepsilon_{эфф}''| \approx 10\text{--}15$. Длина волны в среде составляет $\lambda_m = \lambda_0 / \sqrt{|\varepsilon_{эфф}''|}$.

Исходя из условия, что фазовый сдвиг между полем, излученным непосредственно антенной, и полем, отражённым от границы «бокс – грунт», не должен превышать 10° (для сохранения синфазности сложения полей в дальней зоне), получаем теоретическую оценку $d_{box} \leq \lambda_m / 36 \approx \lambda_0 / 120$. Однако численный эксперимент с использованием FDTD-ядра показал, что при $d_{box} < \lambda_0 / 20$ (т.е. ~ 1 м на частоте 15 МГц) отражения от пластиковых стенок начинают интерферировать деструктивно с основным полем, снижая КУ более чем на 1,5 дБ. При $d_{box} = \lambda_0 / 20$ искажения поля не превышают 0,7 дБ, что было подтверждено расчётами дифракции на диэлектрической призме [9].

Аналогично, для зазора между боксом и стенкой котлована (d_{pit}) где преобладают потери на поглощение в щебне ($\sigma_2 = 5 \times 10^{-4}$ См/м.) оптимальное значение определено из условия минимизации поверхностных волн, возникающих на границе раздела «сухой грунт – влажный грунт». Решение уравнения Гельмгольца для вертикально поляризованной волны в ближней зоне даёт минимум искажений при $d_{pit} \approx \lambda_0 / 12$ что согласуется с асимптотическими решениями задачи Зоммерфельда, применёнными в работах [10].

Таким образом, окончательно приняты следующие значения:

- зазор антенна – бокс: $d_{box} = \max(\lambda_0 / 20, 0.15)M$;
- зазор бокс – котлован: $d_{pit} = \max(\lambda_0 / 12, 0.30)M$.

5.3. Расчёт габаритных размеров

- пластиковый бокс:

$$L_{box} = X_{span} + 2d_{box}, W_{box} = Y_{span} + 2d_{box}, \\ H_{box} = \max(0.5, 2d_{box});$$

- котлован:

$$L_{pit} = L_{box} + 2d_{pit}, W_{pit} = W_{box} + 2d_{pit}, \\ H_{pit} = H_{box} + 2d_{pit}.$$

Данные размеры пересчитываются автоматически на каждом шаге оптимизации, что позволяет проектировщику наглядно контролировать соответствие конструкции.

6. Результаты численных экспериментов

Оптимизация проводилась для четырёх частот: 4, 15, 25 и 30 МГц. В таблице 1 приведены значения целевой функции и основных параметров в оптимальных точках.

PSO обеспечивает стабильное значение F в диапазоне 46,90–47,43 против сильного разброса у GMS. На частоте 15 МГц улучшение составило $\sim 18\%$. Полученные значения $G \approx 4,4$ дБи коррелируют с расчётными уровнями поля для трёхслойной среды, где затухание составляет ~ 3 дБ на частоте 4 МГц.

6.1. Анализ чувствительности параметров PSO

Для оценки устойчивости и влияния параметров роя на сходимость в диссипативной слоистой среде, были проведены серии запусков (по 10 для каждого набора) при фиксированной частоте 15 МГц. Варьировались коэффициенты ускорения c_1 и c_2 в диапазоне от 1,0 до 2,5, а также стратегия изменения коэффициента инерции w .

Результаты (табл. 2) показывают, что классическая конфигурация $c_1 = c_2 = 1,5$ с линейным убыванием w от 0,9 до 0,15 обеспечивает минимальное среднее значение целевой функции $\bar{F} = 47,23$ и наименьшее среднеквадратическое отклонение ($\sigma_F = 0,35$).

Таблица 1.

Сравнение результатов оптимизации GMS и PSO

Частота, МГц	Метод	F	G	R	X
4	GMS	55,12	5,5	47,3	5,2
4	PSO	47,12	4,35	47,4	4,5
15	GMS	56,23	5,8	56,2	5,4
15	PSO	47,23	4,4	47,2	5,2
25	GMS	53,04	4,5	48,0	4,8
25	PSO	46,90	4,5	46,9	4,7
30	GMS	90,75	6	48,8	4,7
30	PSO	47,43	4,5	46,6	4,5

Таблица 2.

Результаты анализа чувствительности PSO

Параметры	Среднее $\bar{F}$	Стандартное отклонение	Комментарий
$c_1 = c_2 = 1,0$	48,90	0,85	Медленная сходимость
$c_1 = c_2 = 1,5$	47,23	0,35	Оптимальный баланс
$c_1 = c_2 = 2,0$	49,15	1,20	Сильные колебания (перелёт через оптимум)
$w = 0,4$ (фиксированный)	48,20	0,60	Преждевременная сходимость (premature convergence)

Установлено, что при $c_1 = c_2 > 1,8$ частицы теряют инерцию, что в условиях высоких штрафов (Penalty = 1000) приводит к нарушению геометрических ограничений $L_1 < 0,8L$ в 30 % запусков. Таким образом, выбранные параметры $c_1 = c_2 = 1,5$ являются робастными и рекомендуются для решения задач параметрического синтеза в диссипативных средах.

6.2. Анализ геометрической сложности

В таблице 3 показано, что PSO находит предельно простое решение, строго соблюдая ограничения, тогда как GMS предлагает избыточно сложную структуру, нарушающую условия по длине ответвлений.

Физическая интерпретация выбора $L = 8,75$ м. В отличие от эвристического решения GMS, алгоритм PSO выбрал длину основного вибратора $L = 8,75$ м, что значительно превышает классическую полуволновую длину для данной частоты в воздухе (10 м), но приближается к эффективной длине волны в среде с потерями.

Согласно модели слоистой среды, относительная комплексная диэлектрическая проницаемость составляет ($\epsilon_{эфф} \approx 10 - i5$). Длина волны в такой среде определяется как:

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{|\epsilon_{эфф}|}} \approx \frac{20}{\sqrt{11,2}} \approx 6M.$$

Полуволновой резонансный вибратор должен иметь длину $L \approx \frac{\lambda_{eff}}{2} = 3M$. Однако PSO выбрала 8,75 м, что соответствует режиму «удлинённого вибратора» ($L > \lambda/2$).

Это объясняется тем, что в сильно диссипативной среде (щебень с $\sigma = 5 \times 10^{-4}$ См/м.) распределение тока смещается к пучности на концах (эффект укорочения). Увеличение геометрической длины до 8,75 м позволяет компенсировать реактивную составляющую ($X_{calc} = 5,2$ Ом близка к 0) и увеличить активную составляющую сопротивления излучения до $R = 47,2$ Ом (близкой к 50 Ом) за счёт увеличения площади под кривой распределения тока ($\int I(z)dz$) что прямо следует из выражения для действующей длины $l_d = \int I(z)dz$ [12]. Таким образом, PSO физически компенсирует потери в грунте за счёт увеличения эффективной апертуры антенны.

6.3. Сравнение с эталонной конструкцией

Для количественной оценки эффективности разработанной многовибраторной системы, проведено сравнение с классическим полуволновым симметричным вибратором (диполь) той

Таблица 3.

Сравнение оптимальной геометрии на частоте 15 МГц

Параметр (размерность)	GMS (рис. 7)	PSO (рис. 6)	Физический смысл различий
Длина основного вибратора L , м	5,8	8,75	PSO длиннее, что даёт большую действующую длину при низком токе в земле
Длина первичного ответвления L_1 , м	9,0 (нарушение $> 0,8L$)	4,0 ($< 0,8L$)	У GMS – грубое нарушение ограничения, у PSO – в допуске
Длина вторичного ответвления L_2 , м	6,0 (нарушение $> 0,6L$)	2,5 ($< 0,6L$)	У GMS – нарушение, у PSO – строгое соблюдение
Кол-во первичных ответвлений N_1	3	1	GMS – избыточная сложность, PSO – минимализм
Кол-во вторичных ответвлений N_2	3	1	GMS – многократное ветвление, PSO – простота
Соблюдение ограничений	Нет (высокий штраф)	Да (penalty = 0)	Это объясняет разницу в F (90,75 vs 47,43)

Таблица 4.

Сравнение с эталонным диполем ($f = 15$ МГц)

Параметр	Эталон (Диполь)	Оптимизированная модель (PSO)	Выигрыш
Коэффициент усиления G , дБи	1,2	4,4	+3,2 дБ
Активное сопротивление R , Ом	12,3	47,2	Согласовано
Действующая длина l_d , м	1,5	3,2	+113 %
Соблюдение ограничений	Да	Да	–

же длины $L = 5$ м, помещённым в те же условия залегания (без ответвлений, без оптимизации). Расчёт показал, что для эталонного диполя на частоте 15 МГц коэффициент усиления составил $G_{ref} = 1,2$ дБи, а активная составляющая входного сопротивления – $R_{ref} = 12,3$ Ом, что указывает на сильное рассогласование.

Разработанная оптимизированная конструкция обеспечивает $G = 4,4$ дБи, что даёт энергетический выигрыш в 3,2 дБ (более чем в 2 раза по мощности). Данный выигрыш достигается благодаря тому, что первичные и вторичные ответвления ($L_1 = 4,0$, $L_2 = 2,5$) увеличивают эффективную поверхность сбора тока, что эквивалентно увеличению действующей длины l_d в 1,8 раза по сравнению с одиночным диполем. Результаты сравнения с эталонным диполем приведены в таблице 4.

6.4. Расчётные габариты защитных конструкций

В таблице 5 приведены конкретные численные значения габаритов бокса и котлована, рассчитанные автоматически для наилучшего решения PSO на частоте 15 МГц ($\lambda \approx 20$ м). Полученные размеры являются реалистичными для полевых работ и полностью определяются геометрией оптимизированной антенны.

Заключение

В статье предложена и численно реализована многоразовная модель подземной антенны, функционирующей в диссипативной слоистой среде, с параметрами, обоснованными геофизическими данными для района Хомсской впадины. На основе интеграции верифицированного

Таблица 5.

Габариты защитных конструкций (оптимум PSO, 15 МГц)

Параметр	Значение, м
Размах по оси X, X_{span}	21,75
Зазор бокса, d_{box}	1,00
Зазор котлована, d_{pit}	1,67
Длина бокса, L_{box}	23,75
Ширина бокса, W_{box}	2,30
Высота бокса, H_{box}	2,00
Длина котлована, L_{pit}	27,09
Ширина котлована, W_{pit}	5,64
Глубина котлована, H_{pit}	5,34

FDTD-ядра с алгоритмами глобальной оптимизации установлено следующее:

1. Метод роя частиц значительно превосходит метод многократного запуска по стабильности и точности согласования.
2. PSO генерирует технологически эффективные конструкции с минимальным числом ответвлений.
3. Внедрённый алгоритм динамического расчёта размеров защитных конструкций обеспечивает инженерную готовность проекта.
4. Энергетический выигрыш по сравнению с эталонным диполем составляет 3,2 дБ.
5. Рекомендуется использовать PSO с параметрами (50 частиц, 150 поколений, $c_1 = c_2 = 1,5$) для параметрического синтеза заглублённых антенных систем.

Литература

1. Бородулин Р. Ю. Численные методы электродинамики: моногр. СПб.: ВАС, 2016. – 180 с.
2. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. – 3rd ed. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2012. – 848 p.
3. Berenger J. P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comp. Phys. – 1994. – Vol. 114. – No. 2. – Pp. 185–200.
4. Бородулин Р. Ю., Ключко Н. Ю. Методика расчета характеристик антенн, расположенных в полубесконечной среде с потерями, методом конечных элементов // Информация и космос. – 2016. – № 2. – С. 41–44.
5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2016. – 1104 p.
6. Эберхарт Р., Кеннеди Дж. Новый оптимизатор, использующий теорию роя частиц / материалы 6-го Международного симпозиума по микромашинам и наукам о человеке, Nagoya, Japan, 4–6 октября 1995 г, 1995. – IEEE: Пискатауэй, Нью-Джерси, США, 1995. – С. 39–43.

7. Марти Р., Ресенде М. Г. С. и Рибейро К. С. Методы комбинаторной оптимизации с несколькими запусками // Европейский журнал операционных исследований, апрель 2013 г. – 226(1):1–8.
8. Бородулин Р. Ю. Методы увеличения эффективности антенн, погруженных в диссипативные среды // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 2. – С. 39–46.
9. Jin J. The Finite Element Method in Electromagnetics. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2014. – 872 p.
10. Бородулин Р. Ю. Применение концептуальных моделей численных методов электродинамики для анализа характеристик вибраторов в бесконечных диссипативных средах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – № 4 (252). – С. 29–42.
11. Бородулин Р. Ю., Исмаил М. М., Юртаев А. С., Боробов А. А. Исследование влияния многослойных диссипативных сред на эффективность антенн дециметрового диапазона // Телекоммуникации и связь. – 2026. – № 2 (11). – С. 36–42. – DOI: 10.21681/3034-4050-2026-2-36-42.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MULTIVIBRATOR UNDERGROUND ANTENNA OPERATING IN DISSIPATIVE LAYERED MEDIA

Leonyuk A. S.⁴, Yurtaev A. S.⁵, Ismail M. M.⁶

Keywords: numerical simulation, hybrid algorithm, global optimization, electrodynamic core, geophysical parameters, protective structure, frequency range, particle swarm algorithm, radiation efficiency, diffraction distortions.

Abstract

Objective: to develop a comprehensive model of a multivibrator underground antenna operating in dissipative layered media, considering real geophysical parameters, and to create an algorithm for automatic calculation of the dimensions of protective structures.

Method: a hybrid parametric optimization algorithm was used, integrating an electrodynamic nucleus implemented by the finite difference in time domain (FDTD) method with the particle swarm method (PSO). The calculations were performed for the frequency range of 4–30 MHz, considering a two-layer model of the underlying volume (sand/crushed stone), the parameters of which were substantiated by geophysical data for the Homs Depression area.

Results: the optimal geometric parameters of the antenna were obtained, providing a gain of 4.4 dBi and an active impedance of 47.2 Ohm at a frequency of 15 MHz, which gives an energy gain of 3.2 dB compared to the reference half-wave dipole. An algorithm for automatic calculation of the dimensions of a plastic box and a pit based on the wavelength and optimized antenna dimensions was developed and verified.

Scientific novelty: for the first time, a complex model linking geophysical data of a real region with numerical electrodynamic modeling and global optimization is proposed; for the first time, automatic calculation of protective structures based on the analysis of diffraction distortions in the near field is implemented.

References

1. Borodulin R. Yu. Chislennyye metody ehlektrodinamiki: monogr. SPb.: VAS, 2016. – P. 180.
2. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. – 3rd ed. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2012. – P. 848.
3. Berenger J. P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comp. Phys. – 1994. – Vol. 114. – No. 2. – Pp. 185–200.
4. Borodulin R. Yu., Klyuchko N. Yu. Metodika rascheta harakteristik antenn, raspolzhenykh v polubeskonechnoy srede s poteryami, metodom konechnykh ehlementov // Informatsiya i kosmos. – 2016. – No. 2. – Pp. 41–44.
5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2016. – P. 1104.
6. Ehberhart R., Kennedy Dzh. Novyy optimizator, ispol'zuyushchij teoriyu roya chastic / materialy 6-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po mikromashinam i naukam o cheloveke, Nagoya, Japan, 4–6 oktyabrya 1995 g, 1995. – IEEE: Piskatauehij, N'yu-Dzhersi, SSHA, 1995. – Pp. 39–43.
7. Marti R., Resende M. G. S. i Ribeyro K. S. Metody kombinatornoj optimizatsii s neskol'kimi zapuskami // Evropejskij zhurnal operatsionnykh issledovaniy, aprel' 2013 g. – 226(1):1–8.
8. Borodulin R. Yu. Metody uvelicheniya ehffektivnosti antenn, pogruzhenykh v dissipativnye sredy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioehlektronika. – 2017. – No. 2. – Pp. 39–46.
9. Jin J. The Finite Element Method in Electromagnetics. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2014. – P. 872.

⁴ Anton S. Leonyuk, Associate Professor of the Department of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: leonuck@yandex.ru

⁵ Anton S. Yurtaev, Adjunct of the Department of the Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: ant8720@yandex.ru

⁶ Ismail Mohammad, Adjunct of the Department of the Military Academy of Communications named after S.M. Budenny, St. Petersburg, Russia. E-mail: mohammad.esmaael.2024@gmail.com

10. Borodulin R. Yu. *Primenenie konceptual'nyh modelej chislennykh metodov ehlektrodinamiki dlya analiza harakteristik vibratorov v beskonechnykh dissipativnykh sredah* // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. – 2016. – No. 4 (252). – Pp. 29–42.
11. Borodulin R. Yu., Ismail M. M., Yurtaev A. S., Borobov A. A. *Issledovanie vliyaniya mnogoslujnykh dissipativnykh sred na ehffektivnost' antenn dekametrovogo diapazona* // Telekommunikacii i svyaz'. – 2026. – No. 2 (11). – Pp. 36–42. – DOI: 10.21681/3034-4050-2026-2-36-42.

