

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СРЕД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТЕНН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Бородулин Р. Ю.¹, Исмаил М. М.², Юртаев А. С.³, Боропов А. А.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2026-2-36-42

Ключевые слова: коротковолновые антенны, защищенные антенны, параметрический синтез, коэффициент защитного действия, подземные антенны, диссипативные среды, метод конечных разностей во временной области.

Аннотация

Цель работы: анализ влияния изменений электрических свойств грунта (проводимости и диэлектрической проницаемости) на форму диаграммы направленности и эффективность излучения заглубленных антенн в декаметровом диапазоне радиоволн с учетом сезонных изменений почвы.

Метод исследования: в качестве численных методов определения электрических характеристик элементов – метод конечных разностей во временной области.

Результаты исследования: разработана математическая модель, основанная на методе конечных разностей во временной области (FDTD), для моделирования распространения электромагнитных волн в слоистых диссипативных средах. Представленная модель демонстрирует высокую чувствительность к коэффициенту электрической проводимости почвы. Доказано, что эффективность излучения можно улучшить за счет управления частотой и геометрией антенны.

Практическая ценность: полученные результаты обеспечивают прочную основу для проектирования защищенных систем связи в сложных условиях, таких как неоднородные почвы пустыни.

Вклад соавторов: Бородулин Р. Ю. – постановка задачи исследования, выбор численного метода электродинамики; Исмаил М. М. – разработка математической модели электродинамического воздействия различных слоев грунта на заглубленную антенну; Боропов А. А. – разработка методологии исследования, построение вычислительного алгоритма модели; Юртаев А. С. – сравнительная оценка влияния состава почвы и глубины погружения вибратора на эффективность излучения.

Введение

Системы связи декаметрового диапазона (3–30 МГц) находят все более широкое применение в военной и гражданской сферах благодаря их способности обеспечивать связь на большие расстояния без необходимости построения сложной инфраструктуры. Использование таких систем в боевых условиях затруднено из-за высокой уязвимости антенн перед воздействием противника.

В стационарных системах эта проблема решается применением подземных антенн. Заглубление антенны приводит к значительному изменению ее излучающих свойств из-за взаимодействия с диссипативной средой, где электрическая проводимость σ и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r изменяются в зависимости от состояния и состава почвы [1].

Разработчики защищенных стационарных антенных систем сталкиваются с противоречием между необходимостью обеспечения работы

в широком диапазоне частот, высокого коэффициента полезного действия (КПД) с одной стороны, и ограничениями на геометрические параметры антенн, с другой. Данное противоречие может быть разрешено на этапе проектирования антенных систем, путем разработки точных математических моделей и использования продвинутых алгоритмов оптимизации [2].

Постановка задачи

На территории Сирийской Арабской Республики грунты характеризуются значительным разнообразием и слоистой неоднородностью, что затрудняет точное прогнозирование характеристик проектируемых подземных антенных систем.

Таким образом, возникает необходимость в создании точной математической модели, способной адекватно описывать электродинамическое воздействие различных слоев грунта

¹ Бородулин Роман Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: borodulroman@yandex.ru

² Исмаил Мохаммад Малик, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mohammad.esmaael.2024@gmail.com

³ Юртаев Антон Сергеевич, адъюнкт Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ant8720@yandex.ru

⁴ Боропов Антон Андреевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: antonborobov@yandex.ru

на заглубленную антенну. Это требует введения понятия комплексной эффективной диэлектрической проницаемости, учитывающей диэлектрические и проводящие свойства каждого слоя, а также учет межслоевых взаимодействий. Данный подход позволяет снизить вычислительную сложность, сохраняя при этом точность описания волнового распространения в слоистых средах.

Математические основы модели

Математическая модель, соответствующая диссипативным средам (таким как почва), может быть представлена следующим уравнением распространения:

$$\nabla^2 E - j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)E = \nabla^2 E - \gamma^2 E = 0,$$

где E – напряженность электрического поля (В/м); ω – угловая частота (рад/с); μ – магнитная проницаемость среды (Гн/м); σ – удельная электрическая проводимость среды (См/м); ε – диэлектрическая проницаемость среды (Ф/м); γ – комплексная постоянная распространения.

Первый член $\nabla^2 E$ характеризует распространение волны в вакууме.

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta,$$

где α – коэффициент затухания (Нп/м); β – коэффициент фазы (рад/м).

Действительная часть α : коэффициент затухания, отражающий потери энергии в среде за счет электропроводности.

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1\right]}.$$

Мнимая часть (β): коэффициент фазы, определяющий фазовую скорость и длину волны в среде.

Для моделирования электромагнитного взаимодействия между антенной и многослойной грунтовой средой использовался метод конечных разностей во временной области (Finite-Difference Time-Domain, FDTD). Данный метод основан на решении уравнений Максвелла в дифференциальной форме с использованием алгоритма Йи на смещенной пространственной сетке [3].

Работа модели может быть представлена обобщенным алгоритмом (рис. 1).

Определение размера ячейки. Для определения размера ячейки Δ применялся стандартный критерий, согласно которому для обеспечения точности результатов количество ячеек на длину волны должно быть не менее 10–20. Для повышения эффективности вычислений использовалась неравномерная сетка: в областях вблизи антенны и фидерных линий: $\Delta = \lambda/30$ для точного описания резких изменений полей; в удаленных областях и грунтовых слоях: $\Delta = \lambda/15$ с учетом того, что длина волны в диссипативной среде короче, чем в воздухе ($\lambda_{\text{среды}} = \lambda_0/\varepsilon r$).

Определение временного шага. Временной шаг Δt выбирался в соответствии с условием Куранта–Фридрихса–Леви (CFL) для обеспечения устойчивости численного решения:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}},$$

где: c – скорость света.

В расчете был использован коэффициент запаса 0,9, т.е. $\Delta t = 0,9 \times \Delta t_{\text{max}}$. Общее количество временных шагов выбиралось достаточным для затухания полей до нуля внутри расчетной области (обычно $N = 10000$ шагов).



Рис. 1. Алгоритм работы модели

Определение граничных условий. Для моделирования открытого пространства и предотвращения нежелательных отражений от границ расчетной области применялись поглощающие граничные условия типа «идеально согласованные слои» (Perfectly Matched Layers, PML) которые моделируют бесконечную область с экспоненциальным затуханием амплитуды падающей волны. Эта техника не имеет никакого отношения к физическим процессам, происходящим в макроскопической электродинамике, поскольку основана на искусственно введенной пространственной дисперсии падающих плоских волн, моделируемой на границах расчетной области. Тип PML: Использовалась техника сверточных PML (Convolutional PML, CPML), реализованная во всех шести направлениях ($\pm x, \pm y, \pm z$). CPML обладает высокой эффективностью поглощения поверхностных и наклонных волн по сравнению с традиционными типами [4]. Толщина PML: На каждой границе использовалось 10 слоев (ячеек) PML с постепенным увеличением проводимости согласно полиномиальной функции степени $m = 4$:

$$\sigma(\rho) = \sigma_{max} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^m,$$

где ρ – расстояние от начала PML, δ – полная толщина PML, а σ_{max} рассчитывалась для достижения теоретического коэффициента отражения $R_0 = 10^{-5}$.

Моделирование источника возбуждения. Моделирование источника питания антенны выполнялось двумя способами для сравнения:

1. Сосредоточенный источник напряжения (Lumped Voltage Source): идеальный источник напряжения с внутренним сопротивлением $Z_0 = 50 \Omega$ помещался в зазор питания между плечами дипольной антенны. Этот метод отличается простотой и быстротой моделирования.
2. Распределенный порт (Distributed Port): Для более точного исследования влияния структуры питания на результаты использовалась модель распределенного порта, охватывающая всю область зазора питания.

В качестве формы волны возбуждения применялся модулированный гауссов импульс, что позволяет охватить требуемый частотный диапазон (3–30 МГц) за одно моделирование [5]:

$$V(t) = \sin(2\pi f_0(t - t_0)) e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2}.$$

Обработка пересечения антенны с границами различных слоев. Границы раздела между различными слоями грунта (воздух/сухой грунт/влажный грунт) представляют особую сложность

при моделировании. Обработка выполнялась следующим образом:

1. Определение электрических характеристик каждой ячейки: значения ϵ , σ , μ присваивались каждой ячейке сетки на основе ее геометрического положения относительно различных слоев. На границах использовалось усреднение значений для избежания резких разрывов.
2. Моделирование тонкопроволочной антенны (Thin-Wire Modeling): Поскольку диаметр антенны ($a = 2$ мм) значительно меньше размера ячейки (Δ), применялась модифицированная модель тонкого провода (Thin-Wire Model). Эта модель включает коррекцию уравнений поля вокруг провода для учета экспоненциального поведения ближнего поля путем корректировки значений диэлектрической и магнитной проницаемостей в ячейках, окружающих провод, в соответствии с фактическим радиусом провода [6].

Расчет геометрических параметров антенны. Целью проектирования антенны является получение определенной диаграммы направленности. Как правило, требуемая форма диаграммы направленности диктуется конкретной задачей – например, обеспечением скрытой связи или управлением беспилотными летательными аппаратами на передовых рубежах, где из-за непрерывных обстрелов и хаотичных разрушений развертывание стационарной сети связи крайне затруднительно. В таких условиях ставка делается на недорогие системы связи, способные обеспечивать непрерывность работы с минимальными затратами. Эту задачу как раз и решают антенны рассматриваемого типа. Геометрические параметры антенны определяют её диаграмму направленности на конкретной частоте [7].

$$I_n(z) = I_{0n} \cdot \frac{\sin[k(I_n - |z|)]}{\sin(kI_n)},$$

где: I_{0n} – ток питания n -го вибратора; I_n – длина n -го вибратора; k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

В рамках данного исследования было найдено компромиссное решение, обеспечивающее наилучшее согласование таких параметров, как длина антенны, рабочая частота, характеристики слоёв грунта, глубина заглубления, тип металла и необходимое защитное покрытие для предотвращения окисления, которое напрямую влияет на эффективность работы этих антенн (рис. 2).

Дискретизация излучателя и окружающего пространства при использовании метода КРВО создает необходимость определения взаимной импедансной связи между элементами антенны и достижения их достижения их согласования

Подземная антенна UnderwaterDipole - Частота: 30.0 МГц - L1=22.0 м - L1=4.0 м, L2=2.0 м - D1=3.0 м, D2=2.5 м | Металл: Медь (Почва: Влажная почва)

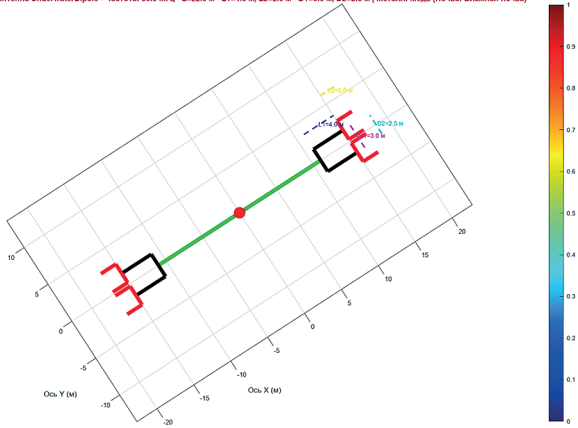


Рис. 2. Конструкция исследуемой антенны

по размерам и сопротивлению, взаимное сопротивление двух элементов может быть описано выражением [8]:

$$Z_{mn} = \frac{1}{I_m I_n} \int E_m J_n dV,$$

где E_m – электрическое поле, создаваемое m -м вибратором; J_n – плотность тока на n -м вибраторе.

Коэффициент отражения, рассчитывается по формуле:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0},$$

где Z – входное сопротивление антенны; Z_0 – сопротивление источника.

Важность влияния диссипативной среды обусловлена широкой вариативностью её свойств. Помимо поглощения излучения в почве, следует учитывать и действия противника по размещению отражателей, влияющих на эффективность работы антенн, над поверхностью земли. Однако, в данной работе влияние материалов, которые могут быть размещены над поверхностью грунта выведены в ограничения.

Таким образом, при оценке влияние диссипативной среды на распространение радиоволны

будем учитывать только коэффициент затухания в почве [9]:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]}.$$

В проводящей среде (почве, воде) электромагнитная волна экспоненциально затухает из-за потерь на джоулево тепло. Глубина проникновения δ обратно пропорциональна коэффициенту затухания α

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}.$$

Расчет эффективности излучения антенны для различных глубин погружения и параметров почвы. Оценка эффективности излучения в различных средах произведена по результатам расчетов коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента защитного действия (КЗД) антенны [10]:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{LOSS}},$$

$$КЗД = \frac{P_{max(protected)}}{P_{max(unprotected)}}.$$

Результаты моделирования

На основе вышеизложенного проведено моделирование работы антенны в различных средах в зависимости от глубины погружения в грунт:

- а) первый случай: близко к поверхности (воздух) в первом слое – влажный грунт, во втором слое – сухой грунт (рис. 3);
- б) второй случай: первый слой – сухой грунт, второй слой – влажный грунт (рис. 4):

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Влажный грунт дает наименьший процент эффективности излучения – около 45 %. Это объясняется тем, что относительно высокая проводимость ($\sigma = 0,02$ см/м) увеличивает потери энергии и снижает эффективность. В то же время в сухом грунте уровень КПД достигает 68 %,

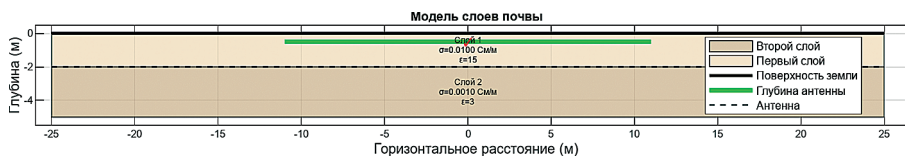


Рис. 3. Положение антенны для первого случая

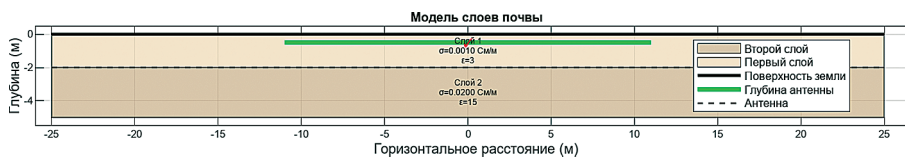


Рис. 4. Положение антенны для второго случая

Таблица 1.

Сравнение характеристик антенны в различных средах

| Эффективность излучения | α (дБ/м) | ϵ_r | σ (см/м) | Среда распространения волн |
|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------------------|
| %98 | 0 | 1 | 0 | Воздух |
| %45 | 2,1 | 15 | 0,02 | Влажная почва |
| %68 | 0,8 | 3 | 0,001 | Сухая почва |

Подземная антенна UnderwaterDipole - Частота: 30.0 МГц - L=22.0 м - L1=4.0 м, L2=2.0 м - D1=3.0 м, D2=2.5 м | Металл: Медь (Слой почвы: 2.0 м * 3.0 м)

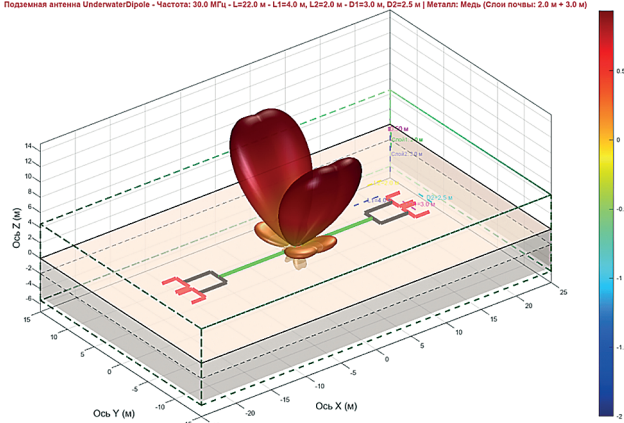


Рис. 5. Диаграмма направленности для первого случая

Подземная антенна UnderwaterDipole - Частота: 30.0 МГц - L=22.0 м - L1=4.0 м, L2=2.0 м - D1=3.0 м, D2=2.5 м | Металл: Медь (Слой почвы: 2.0 м * 3.0 м)

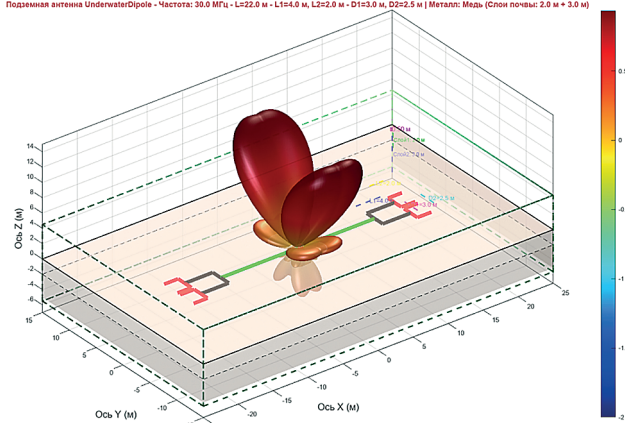


Рис. 6. Диаграмма направленности для второго случая

так как низкая проводимость почвы (около 0,001 см/м) уменьшает потери и улучшает эффективность.

Снижение эффективности излучения подтверждается сравнением диаграммы направленности антенны для двух рассматриваемых случаев (рис. 5, 6).

Зависимость коэффициента усиления антенны от частоты носит более выраженный экспоненциальный характер для влажной почвы (рис. 7), что подтверждает непротиворечивость представленной выше модели.

Таким образом, представленная модель демонстрирует высокую чувствительность к коэффициенту электрической проводимости почвы.

Доказано, что эффективность излучения можно улучшить за счет управления частотой и геометрией антенны.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что результаты моделирования, представленные в работе, не противоречат известным научным данным, что подтверждает их достоверность

Заключение

В ходе проведенного исследования, разработана модель многовибраторной антенны, погруженной в среду с потерями, где взаимодействие между вибратором и окружающим пространством моделируется с использованием метода

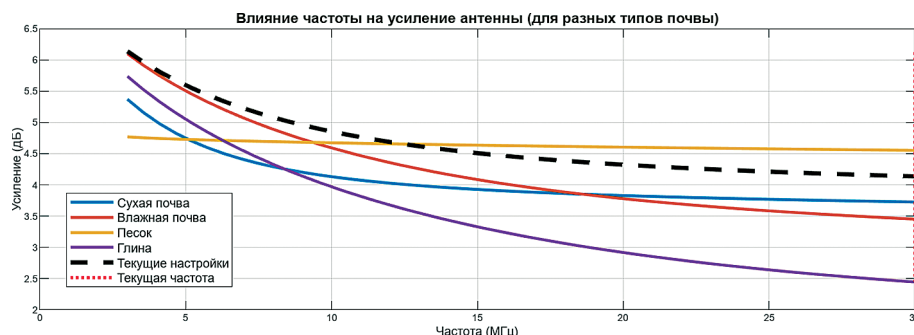


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления антенны от частоты

КРВО. Модель основана на предположении, что среда является квази-бесконечной и поглощающей энергию, что позволяет точнее моделировать работу антенны под землей.

Модель предоставляет математическую основу для проектирования высокоэффективных защищенных антенн.

Литература

1. Бородулин Р. Ю. Методы увеличения эффективности антенн, погруженных в диссипативные среды // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Вып. 2. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 39–45.
2. Баланис К. А. Теория антенн: анализ и проектирование (4-е изд.). Уайли, 2016.
3. Тафлав, А., Хагнесс, С. К. Вычислительная электродинамика: Метод конечных разностей во временной области (3-е изд.). Artech House, 2005.
4. Артемов М. Л. Направления совершенствования характеристик перспективных антенных систем / М. Л. Артемов, О. В. Афанасьев, М. П. Сличенко // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 5. С. 184–198.
5. Бородулин Р. Ю. Конструктивный синтез малогабаритных электрических антенн. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2020.
6. Кинг Р. У. П., и Смит, Г. С. Антенны в материи: основы, теория и приложения. Издательство Массачусетского технологического института, 1981.
7. Уэйт Дж. Р. Электромагнитные волны в стратифицированных средах. IEEE Press, 1996.
8. Смит Г. С. «Сравнение антенн с электрическим приводом для использования в геофизической разведке». Труды IEEE по наукам о земле и дистанционному зондированию, GE 22(6), 1984. С. 543–549.
9. Бородулин Р. Ю. Анализ эффективности синфазной системы погруженных вибраторов // Телекоммуникации. 2017. № 9. С. 28–35.
10. Бородулин Р. Ю. Применение концептуальных моделей численных методов электродинамики для анализа характеристик вибраторов в бесконечных диссипативных средах // Информатика. Телекоммуникации. Управление. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Вып. 4(236). СПб.: СПбГПУ, 2016. С. 29–42.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MULTILAYER DISSIPATIVE MEDIA ON THE EFFICIENCY OF ANTENNAS OF THE DECAMETER RANGE

Borodulin R. Yu.⁵, Ismail M. M.⁶, Yurtaev A. S.⁷, Borobov A. A.⁸

Keywords: *short-wave antennas, protected antennas, parametric synthesis, coefficient of protective action, underground antennas, dissipative media, finite difference method in the time domain.*

Abstract

Objective: *analysis of the effect of changes in the electrical properties of the soil (conductivity and permittivity) on the shape of the radiation pattern and the radiation efficiency of buried antennas in the decameter range of radio waves, taking into account seasonal changes in the soil.*

Research method: *the method of finite differences in the time domain is used as numerical methods for determining the electrical characteristics of elements.*

Practical value: *the results obtained provide a solid basis for the design of secure communication systems in difficult conditions, such as heterogeneous desert soils.*

Contribution of co-authors: *Borodulin R. Yu. – formulation of the research problem, choice of the numerical method of electrodynamics; Ismail M. M. – development of a mathematical model of the electrodynamic effect of various soil layers on the buried antenna; Borobov A. A. – development of the research methodology, construction of a computational algorithm of the model; Yurtaev A. S. – comparative assessment of the effect of soil composition and immersion depth of the vibrator on the efficiency of radiation.*

References

1. Borodulin R. Yu. Metody' uvelicheniya e'ffektivnosti antenn, pogrzhenny'x v dissipativny'e sredy' // Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij Rossii. Radioe'lektronika. Vy'p. 2. SPb.: SPbGE'TU «LE'TI», 2017. S. 39–45.
2. Balanis K. A. Teoriya antenn: analiz i proektirovanie (4-e izd.). Uajli, 2016.

5 Roman Yu. Borodulin, Dr.Sc. of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: borodulroman@yandex.ru

6 Ismail Mohamad Malik, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: mohammad.esmaael.2024@gmail.com

7 Anton S. Yurtaev, Adjunct of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: ant8720@yandex.ru

8 Anton A. Borobov, Ph.D. of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: antonborobov@yandex.ru

3. Taflav, A., Xagness, S. K. Vy'chislitel'naya e'lektrodinamika: Metod konechny'x raznostej vo vremennoj oblasti (3-e izd.). Artech House, 2005.
4. Artemov M. L. Napravleniya sovershenstvovaniya xarakteristik perspektivny'x anteny'x sistem / M. L. Artemov, O. V. Afanas'ev, M. P. Slichenko // Radiotexnika. 2023. T. 87, № 5. S. 184–198.
5. Borodulin, R. Yu. Konstruktivny'j sintez malogabaritny'x e'lektricheskix antenn. Sankt-Peterburg: Voennaya akademiya svyazi, 2020.
6. King R. U. P., i Smit, G. S. Antenny' v materii: osnovy', teoriya i prilozheniya. Izdatel'stvo Massachusetskogo texnologicheskogo instituta, 1981.
7. Ue'jt Dzh. R. E'lektromagnitny'e volny' v stratificirovanny'x sredax. IEEE Press, 1996.
8. Smit G. S. Sravnenie antenn s e'lektricheskim privodom dlya ispol'zovaniya v geofizicheskoj razvedke. Trudy' IEEE po naukam o zemle i distancionnomu zondirovaniyu, GE–22(6), 1984. S. 543–549.
9. Borodulin R. Yu. Analiz e'ffektivnosti sinfaznoj sistemy' pogrzhenny'x vibratorov // Telekommunikacii. 2017. № 9. S. 28–35.
10. Borodulin R. Yu. Primenenie konceptual'ny'x modelej chislenny'x metodov e'lektrodinamiki dlya analiza xarakteristik vibratorov v beskonechny'x dissipativny'x sredax // Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. Nauchno-texnicheskie vedomosti SPbGPU. Vy'p. 4 (236). SPb.: SPbGPU, 2016. S. 29–42.

