

АНОТАЦІЯ

Плахтій В. А. Надширокосмугові електромагнітні поля в задачах розпізнавання підповерхневих об'єктів штучними нейронними мережами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної проблеми – експериментальному та теоретичному дослідженню процесів випромінювання та поширення нестаціонарних електромагнітних полів у шаруватих середовищах, їх дифракція на підповерхневих об'єктах, прийому відбитих хвиль та розпізнавання цих об'єктів і їхнього місця розташування за допомогою штучних нейронних мереж.

Метою дисертаційної роботи є виявлення основних фізичних процесів перетворень імпульсних надширокосмугових електромагнітних полів у ближній і дальній зонах антен, на границях матеріальних середовищ та занурених в них об'єктів складної форми і складу з метою їхнього надійного розпізнавання в умовах завад за допомогою штучних нейронних мереж.

З першого розділу, який є оглядовим, випливає, що багато природних і штучних електромагнітних процесів у нашому житті є нестаціонарними. Тому вивчення походження електромагнітних хвиль у ближній зоні випромінювачів і їх поширення у вільному просторі і матеріальних середовищах є актуальною задачею, яка безпосередньо стосується теми дисертації. Окрім вивчення електромагнітних процесів, що супроводжують роботу надширокосмугових радарів підповерхневого зондування, є необхідність у виборі, застосуванні і оптимізації методів обробки інформації, яку необхідно отримати для надійного

визначення типу і положення підповерхневого об'єкта в умовах завод через неоднорідність середовища та винятково малої інформаційної енергетичної складової відбитих полів. Описані переваги електродинамічних методів у часовому просторі для розв'язання поставлених задач. Також підкреслюється важливість визначення діелектричних характеристик матеріальних середовищ через їхній значний вплив на результати пошуку і розпізнавання прихованих об'єктів. Описано підгрунття, як вирішення задачі розпізнавання відбитого сигналу штучною нейронною мережею може бути застосовано до задачі позиціонування на основі цього нового підходу.

У другому розділі розглянуто нестационарне випромінювання найпростішої моделі реального випромінювача – елементарного випромінювача нескінченно малих розмірів, що породжується протіканням електричного струму із довільною часовою залежністю. Не дивлячись на те, що такий випромінювач не може бути створений, що він є моделлю, яка не враховує природи збуджуючого струму, критерії його малості не є однаковими в усіх напрямках, і безпосередня експериментальна перевірка його характеристик неможлива, дослідження даного випромінювача розкриває сутність ключових фізичних процесів, що протікають в усіх антенах і їх околі, та процес формування електромагнітної хвилі. Але нестационарний режим його збудження додатково розкриває низку особливостей поведінки електромагнітного поля навколо диполя Герца завдяки жорсткій підпорядкованості процесів принципу причинності на відміну від класичного підходу із використанням гармонічної залежності струму. Представлений підхід застосовується для дослідження властивостей електромагнітного випромінювання сучасних рейкотронних систем та комбінованих надширокосмугових антен електричного і магнітного типу. Класичні формули для усіх компонент випромінюваного поля, в тому числі і в ближній зоні, є наближеними, так як отримані у наближенні малості довжини диполя і його товщини. Застосування розкладу компонент векторного потенціалу в ряд

Тейлора за малим параметром з врахуванням більшої кількості членів ряду у порівнянні із класичною процедурою дозволяє отримати електромагнітні поля в аналітичному вигляді. Це дозволяє в явному вигляді побачити, що в безпосередній близькості від джерела струму складові випроміненої хвилі згасають. Їх ідентифікація легко проводиться завдяки використанню розв'язку у часовому просторі, тому що хвилева частина електромагнітного поля має іншу часову залежність, а саме, пропорційна першій похідній за часом від збуджуючого струму.

Обґрунтовано критерій межі хвильової зони для випромінювача з геометричними параметрами рейкотрона, який у цьому випадку пов'язаний тільки з характерною тривалістю випроміненого імпульсу й зовсім не залежить від розмірів випромінювача. Було досліджено надширокосмуговий аналог комбінованого випромінювача Клевіна, який поєднує в собі випромінювачі магнітного та електричного типу.

Третій розділ присвячено виявленню підповерхневих об'єктів, що занурені у діелектричне середовище із втратами, яким є ґрунти, за допомогою опромінення надширокосмуговими електромагнітними полями сучасних радарів, які в переважній більшості використовують антени апертурного типу. Це потребує теоретичного дослідження у часовому просторі процесів проходження нестаціонарних хвиль через границю розподілу двох середовищ. На відміну від класичних результатів, де використовується джерело у вигляді пласкої хвилі, тут розглядається апертурний випромінювач, як джерело, із подальшим аналітичним розв'язанням цієї задачі у часовому просторі методом еволюційних рівнянь. Незнання діелектричної проникності та втрат ґрунтів є однією з найсерйозніших проблем при їх радарних дослідженнях. Представлений декомпозиційний підхід є обґрунтованим через те, що, загалом, ця теоретико-практична задача є лінійною і тому дозволяє окремий розгляд її складових із подальшим врахуванням результатів досліджень.

Завдяки еволюційному підходу було аналітично розв'язано у часовому просторі задачу опромінення діелектрика нестационарною хвилею апертурним джерелом скінченних розмірів. Шляхом зшивання компонент поля у часовому просторі вдалося у першому наближенні отримати аналітичні вирази для відбитого поля і поля, що пройшло в середовище. Отримані результати можна легко узагальнити для випадку імпульсу довільної форми за допомоги методу інтегралу Дюамеля та для довільних точок спостереження.

Визначення діелектричної проникності проведено шляхом порівняння розрахункових залежностей коефіцієнта передачі резонатора від розташування зразка при різних значеннях з аналогічною вимірюваною залежністю по мінімуму значення стандартного відхилення.

У четвертому розділі продемонстровано застосування штучних нейронних мереж для прямого, в часовому просторі, розпізнавання прийнятих надширококутових сигналів з метою визначення положення приймача відносно стаціонарних випромінювачів, збуджених імпульсними струмами, та типу і положення прихованого під поверхнею ґрунту об'єкту. Стійкість класифікації об'єктів тестується за допомогою вивчення реакції штучних нейронних мереж (ШНМ) на внесення адитивного шуму. Швидкість і надійність розпізнавання перевіряється порівнянням з кореляційним підходом. Практична цінність запропонованого підходу ілюструється використанням близького до реального джерела полів з обмеженою енергією, розташованого на невеликій висоті від ґрунту, застосуванням такого складного для розпізнавання об'єкта, як реальна протипіхотна міна, та спроба прямого навчання штучної нейронної мережі на розпізнавання мін з даних експериментальних радарограм, знятих в умовах, близьких до реальних.

Система позиціонування на зміні форми випроміненої хвилі без носійного гармонічного коливання може бути ефективно використана у закритих приміщеннях та обмежених за розміром площах. Відмінною особливістю

позиціонування на імпульсних електромагнітних хвилях є її висока завадостійкість до існуючих вузькосмугових електромагнітних хвиль. Порівняння ШНМ та методів кореляції для розпізнавання кутів показує, що штучні нейронні мережі можуть продемонструвати кращу точність, ніж кореляційний підхід. Досліджено вплив тривалості електромагнітного імпульсу на якість класифікації кутів за наявності шуму для обох представлених методів.

Задача виявлення глибини розташування металевого об'єкту, який прихований в однорідному середовищі за допомогою ШНМ, що аналізує відбите імпульсне електромагнітне поле, очікувано є більш складною, ніж задача встановлення його присутності. Для випадку моделі з надширокосмуговим опромінювачем типу «Метелик» досліджена чутливість ШНМ до зміни висоти антенної системи.

Досліджуються апроксимаційні властивості ШНМ, що дозволяють їм ефективно протистояти шумам у вхідних даних. Перевіряється вплив попередньої обробки вхідних сигналів вейвлет-перетворення та методу гусениці для знешумлення на результати класифікації ШНМ. Для вирішення задачі розпізнавання моделі міни, захованої в ґрунті, застосовуються ШНМ різних структур, з шарами SoftMax, з методом Dropout і порівнюється їх робота. Досліджуються можливість роботи ШНМ не в режимі інтерполяції, а в режимі екстраполяції, використання її для випадків, які не є проміжними за параметрами, на яких ШНМ тренувалась. Проводиться порівняння методів ШНМ та взаємної кореляції для розпізнавання прихованих об'єктів за наявності білого шуму різного рівня. Досліджується можливість розпізнавання реальних протипіхотних мін аналізом сигналів, отриманих методами числового моделювання та експериментальних досліджень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у таких її результатах:

1. Вперше показано, що актуальним значенням ближньої границі дальньої зони є те, що спостерігається в момент проходження тієї частини імпульсу, що

має найбільше інформаційне навантаження, найбільшу швидкість зміни в точці прийому.

2. Вперше вдалось докорінним чином покращити формування хвилі у ближній зоні імпульсного випромінювача електричного типу, розташовуючи в ній випромінювач магнітного типу. Перевагою такого комбінованого випромінювача, надширокосмугового аналога антени Клевіна, є ефективне формування в невеликому фізичному об'ємі імпульсної хвилі з малими післяімпульсними коливаннями без застосування додаткових штучних омичних втрат, що є актуальним для її застосування для різних задач, в тому числі передачі інформації та зондування.

3. Шляхом зшивання компонент поля у часовому просторі вперше вдалося у першому наближенні отримати аналітичні вирази для відбитого поля і поля, що пройшло в середовище. Продемонстрована можливість формування «електромагнітного снаряду» у середовищі, що опромінене імпульсною електромагнітною хвилею надкороткої тривалості.

4. Запропоновано нову методику розрахунку похибки визначення комплексної діелектричної проникності при порівнянні розрахункової та вимірної баз даних.

5. Вперше показано порівнянням ШНМ та методів кореляції для розпізнавання кутів, що штучні нейронні мережі можуть продемонструвати кращу точність, ніж кореляційний підхід. Надійним є використання ШНМ до значення ССШ = 10 дБ та вище і методу взаємної кореляції для ССШ = 20 дБ та вище. Але навіть для ССШ = 0 дБ ШНМ дає коректне розпізнавання кутів після статистичного усереднення результатів класифікації. ШНМ в числовому моделюванні демонструє час розрахунку на три порядки менший, ніж нам потрібно для розрахунку функції взаємної кореляції.

6. Вперше продемонстровано, що застосування шару SoftMax робить відповіді ШНМ більш контрастними в задачах підповерхневого зондування, але

призводить до ледве помітних помилок. Застосування методу Dropout в цілому підвищило якість роботи ШНМ для цієї задачі.

7. Вперше визначено, що за наявності білого шуму різного рівня немає достовірних переваг у кінцевих результатах розпізнавання позицій об'єкта для обох підходів ШНМ та взаємної кореляції. Метод взаємної кореляції не потребує синхронізації часу між випромінювачем та приймачем, на відміну від ШНМ, але вимагає значного часу розрахунку, тому є можливість покращити якість класифікації розташування об'єкта, поєднавши ці два підходи.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Отримані вирази для полів у ближній зоні нестационарних випромінювачів мають практичну цінність для радарних систем, де об'єкти досліджень знаходяться в ближній зоні, системах неруйнівного контролю. Ці результати важливі для здоров'я обслуговуючого персоналу радарних та рейкотронних систем.

2. Розроблено методики визначення діелектричної проникності з високою точністю та створено випромінювачі, що важливо для точного визначення локальних неоднорідностей в об'єктах в задачах підповерхневого зондування.

3. Запропоновані в роботі випромінювачі можуть бути використані в бездротових локальних мережах, задачах неруйнівного контролю, моніторингу навколишнього середовища, біології, медицині тощо.

4. Надширокосмуговий комбінований випромінювач Клевіна є практично цінним через те, що маючи відносно малі розміри він ефективно випромінює імпульсні електромагнітні хвилі як одиночна антена, так і як елемент антенної решітки.

5. Практична цінність запропонованого підходу розпізнавання на ШНМ ґрунтується на використанні близького до реального джерела полів з обмеженою енергією, розташованого на невеликій висоті від ґрунту, застосуванням до такого складного для розпізнавання об'єкта, як реальна протипіхотна міна. Значну

практичну цінність становить реалізація прямого навчання штучної нейронної мережі на розпізнавання мін з даних експериментальних радарограм, знятих в умовах, близьких до реальних.

б. Практично цікавою є запропонована система позиціонування на імпульсних хвилях через відсутність вимог щодо часової синхронізації передавачів і приймачів та завадостійкість по відношенню до традиційних вузькосмугових систем подавлення.

Ключові слова: електромагнітне поле, електромагнітна хвиля, вібратор, хвилевід, імпульсний радар, радіолокація, широкосмугова імпульсна антена, резонатори, антени, діелектрична проникність, електромагнітне розсіювання, FDTD, дисперсія, нейронна мережа

ABSTRACT

Plakhtii V. A. Ultra-wideband electromagnetic fields in the problems of recognizing subsurface objects by artificial neural networks.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 105 - Applied Physics and Nanomaterials (Physical and Mathematical Sciences) - V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to solving the actual problem, i.e. experimental and theoretical study of the processes of radiation and propagation of transient electromagnetic fields in layered media, their diffraction on subsurface objects, reception of reflected waves and recognition of these objects and their location using artificial neural networks.

The purpose of the dissertation is to study the basic physical processes of transformations of pulsed ultra-wideband electromagnetic fields in the near and far zones of antennas, at the boundaries of material media and objects of complex shape and composition immersed in them in order to reliably recognize them in conditions of interference using artificial neural networks.

From the first chapter, which is an overview, it follows that many natural and artificial electromagnetic processes in our lives are transient. Therefore, the study of the origin of electromagnetic waves in the near-field of radiators and their propagation in free space and material media is an actual task that is directly related to the topic of this thesis. In addition to the study of electromagnetic processes accompanying the operation of ultra-wideband subsurface sensing radars, there is a need to select, apply and optimize methods for processing the information that must be obtained to reliably determine the type and position of a subsurface object in conditions of interference due to the heterogeneity of the environment and the extremely small information energy component of the reflected fields. The advantages of electrodynamic methods in time

domain for solving the set tasks are described. The importance of determining the dielectric characteristics of material media is also emphasized due to their significant impact on the results of searching and recognizing hidden objects. It is described how the solution of the problem of recognizing a reflected signal by an artificial neural network can be applied to the positioning problem based on this new approach.

In the second section, we consider the transient radiation of the simplest model of a real radiator, i.e. the elementary radiator of infinitesimal size generated by the flow of the electric current with arbitrary time dependence. Despite the fact that such a radiator cannot be created, that it is a model that does not take into account the nature of the excitation current, that the criteria for its smallness are not the same in all directions, and that the direct experimental verification of its characteristics is impossible, the study of this radiator reveals the essence of the key physical processes occurring in all antennas and their vicinity, and the process of electromagnetic wave formation. However, the transient mode of its excitation additionally reveals a number of features of the electromagnetic field behavior around the Hertz dipole due to the strict subordination of the processes to the principle of causality, in contrast to the classical approach using the harmonic dependence of the current. The presented approach is used to study the electromagnetic radiation properties of modern railgun systems and combined ultra-wideband electric and magnetic antennas. The classical formulas for all components of the radiated field, including those in the near-field, are approximate, since they are obtained in the approximation of the smallness of the dipole length and its thickness. The use of the Taylor series expansion of the vector potential components in a small parameter with more terms in the series compared to the classical procedure allows us to obtain electromagnetic fields in an analytical form. This makes it possible to see explicitly that the components of the radiated wave in the immediate vicinity of the current source decrease. Its identification is easily carried out by using the solution in time domain, since the wave part of the electromagnetic field has a

different time dependence, namely, it is proportional to the first time derivative of the excitation current.

The criterion of the wave zone boundary for the radiator with geometric parameters of a railgun is substantiated, which in this case is related only to the characteristic duration of the radiated pulse and does not depend on the size of the radiator at all. The ultra-wideband analog of the combined Clewin antenna, which combines magnetic and electric radiators, was investigated.

The third section is devoted to the detection of subsurface objects immersed in a dielectric medium with losses, such as soils, by irradiation with ultra-wideband electromagnetic fields of modern radars, which mostly use aperture-type antennas. It requires a theoretical study in time domain of the processes of transmission of transient waves through the interface between two media. In contrast to the classical results, where a plane wave source is used, an aperture radiator is considered here as a source, followed by an analytical solution of this problem in time domain by the method of evolutionary equations. Not knowing the dielectric constant and losses of soils is one of the most serious problems in their radar studies. The presented decomposition approach is justified by the fact that, in general, this theoretical and practical problem is linear and therefore allows the separate consideration of its components with further consideration of the research results.

The problem of irradiation of a dielectric by a transient wave of the aperture source of finite dimensions was analytically solved in time domain using the evolutionary approach. By stitching the field components in time domain, it was possible to obtain analytical expressions for the reflected field and the field transmitted into the medium in a first approximation. The results obtained can be easily generalized for the case of a pulse of arbitrary time shape using the Duhamel integral method and for arbitrary observation points.

The dielectric constant was determined by comparing the calculated dependences of the resonator transmission coefficient on the sample location at different values with the similar measured dependence by the minimum value of the standard deviation.

Chapter 4 demonstrates the use of artificial neural networks for direct, time-domain recognition of received ultra-wideband signals in order to determine the position of the receiver relative to stationary radiators excited by pulsed currents and the type and position of the object hidden under the ground surface. The stability of object classification is tested by studying the response of artificial neural networks (ANN) to the introduction of additive noise. The speed and reliability of recognition is verified by comparing with the correlation approach. The practical value of the proposed approach is illustrated by the use of a close-to-real source of fields with limited energy located at a low height from the ground, the use of such a difficult object for recognition as a real anti-personnel mine, and an attempt to directly train an artificial neural network for mine recognition from experimental radar data taken under conditions close to real ones.

The positioning system based on the change in the shape of the radiated wave without carrier harmonic oscillation can be effectively used in closed rooms and limited areas. A distinctive feature of positioning based on pulsed electromagnetic waves is its high immunity to existing narrowband electromagnetic waves. A comparison of ANNs and correlation methods for angle recognition shows that artificial neural networks can demonstrate better accuracy than the correlation approach. It is investigated the influence of electromagnetic pulse duration onto the quality of corner classification in the presence of noise for both presented methods.

The task of detecting the depth of a metal object hidden in a homogeneous environment using an ANN that analyzes the reflected pulsed electromagnetic field, as expected, is more difficult than the task of determination of its presence. For the case of the model with the ultra-wideband “butterfly” antenna the sensitivity of the ANN to changes in the height of the antenna system is investigated.

The approximation properties of ANNs that allows them to effectively withstand noise in the input data are investigated. The influence of pre-processing of the input signals by wavelet transform and the caterpillar method for denoising on the ANN classification results is tested. To solve the problem of recognizing a model of a mine hidden in the ground, ANNs of different structures, with SoftMax layers, and with the Dropout method are used and their performance is compared. The possibility of using the ANN in the extrapolation mode rather than interpolation mode is investigated, its use for cases that are not intermediate in terms of the parameters on which the ANN was trained. We compare the ANN and mutual correlation methods for recognizing hidden objects in the presence of white noise of different levels. The possibility of recognizing real anti-personnel mines by analyzing the signals obtained by numerical modeling and experimental studies is investigated.

The scientific novelty of the dissertation is in the following results:

1. For the first time, it is shown that the actual value of the near boundary of the far zone is that observed at the moment of passage of that part of the pulse that has the greatest information load, the greatest rate of change at the receiving point.
2. For the first time, it was possible to radically improve the wave formation in the near-field of the electric impulse radiator by placing the magnetic radiator in it. The advantage of such a combined radiator, an ultra-wideband analog of the Clewin antenna, is the effective formation of a pulse wave with small post-pulse oscillations in a small physical volume without the use of additional artificial ohmic losses, which is relevant for its use in various applications, including information transmission and sensing.
3. By stitching the field components in time space, it was possible to obtain analytical expressions for the reflected field and the field transmitted into the medium in the first approximation. The possibility of forming an "electromagnetic missile" in the medium irradiated by an ultrashort duration pulsed electromagnetic wave is demonstrated.

4. The new methodology for calculating the error of determining the complex permittivity by comparing the calculated and measured databases is proposed.
5. It is shown for the first time by comparing ANNs and correlation methods for angle recognition that artificial neural networks can demonstrate better accuracy than the correlation approach. It is reliable to use ANNs up to the value of $\text{SNR} = 10$ dB and above and the method of mutual correlation for $\text{SNR} = 20$ dB and above. However, even for the $\text{SNR} = 0$ dB, the ANN provides correct angle recognition after statistical averaging of the classification results. In numerical modeling, the ANN demonstrates the calculation time three orders of magnitude less than we need to calculate the mutual correlation function.
6. For the first time, it was demonstrated that the use of the SoftMax layer makes the ANN responses more contrasting in subsurface sensing tasks, but leads to barely noticeable errors. The use of the Dropout method generally improved the quality of the ANN for this task.
7. For the first time, it was determined that in the presence of white noise of different levels, there are no significant advantages in the final results of object position recognition for both ANN and mutual correlation approaches. The mutual correlation method does not require time synchronization between the transmitter and the receiver, unlike the ANN, but requires significant calculation time, so it is possible to improve the quality of object location classification by combining these two approaches.

Practical significance of the results:

1. The obtained expressions for the fields in the near-field of nonstationary radiators are of practical value for radar systems where the objects of study are in the near-field, and non-destructive testing systems. These results are important for the health of the personnel of radar and railgun systems.
2. Methods for determining the dielectric constant with high accuracy have been developed and radiators have been created, which is important for accurate determination of local inhomogeneities in objects in subsurface sensing tasks.

3. The radiators proposed in this work can be used in wireless local area networks, non-destructive testing, environmental monitoring, biology, medicine, etc.
4. The ultra-wideband combined Clewin antenna is practically valuable because of its relatively small size, it effectively radiates pulsed electromagnetic waves both as a single antenna and as an element of an antenna array.
5. The practical value of the proposed ANN recognition approach is based on the use of a source of fields with limited energy close to a real source, located at a low height from the ground, and applied to such a difficult object to recognize as a real anti-personnel mine. Of considerable practical value is the implementation of direct training of an artificial neural network for mine detection from experimental radar data taken in conditions close to real ones.
6. The proposed impulse-wave positioning system is practically interesting because of the absence of requirements for the time synchronization of transmitters and receivers and interference resistance in relation to traditional narrowband suppression systems.

Keywords: electromagnetic field, electromagnetic wave, vibrator, waveguide, impulse radar, radiolocation, broadband pulse antenna, resonators, antennas, permittivity, electromagnetic scattering, FDTD, dispersion, neural network.