Голові спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України
доктору фіз.-мат. наук ІВАНЧЕНКУ І. В.
61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12

ВІДГУК

офіційного опонента, провідного наукового співробітника Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доктора технічних наук, професора СУХАРЕВСЬКОГО Олега Ілліча на дисертаційну роботу ОГУРЦОВОЇ Тетяни Миколаївни «Металеві рамки з феритовим стрижнем як приймальні антени надширокосмугових імпульсних електромагнітних полів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Актуальність дисертаційних досліджень

Застосування надширокосмугових (НШС) імпульсних електромагнітних полів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалостей у радіолокаційних системах різного цільового призначення суттєво розширило можливості традиційної радіолокації. Разом з тим, воно вимагало розробки нових принципів створення більшості пристроїв радіолокаційних систем, в тому числі антен, які перетворюють надкороткі електричні імпульси напруги та струму в надкороткі імпульси електромагнітного поля і навпаки. Кожне конкретне прикладне завдання потребує розробки антен з такими параметрами, які забезпечать його виконання. Дана дисертаційна робота спрямована на розробку приймальних антен радарів для підповерхневого зондування. Для таких завдань приймальні антени мають бути малогабаритними, чутливими і такими, що не спотворюють форму сигналу, що приймається.

Розв'язати задачу чутливого неспотвореного приймання сигналів зондування у вигляді НШС імпульсних електромагнітних полів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалостей можна шляхом використання феритових рамкових антен. Малі габарити рамкових антен, їх широкосмуговість роблять ці антени привабливими для використання на практиці для приймання потужних імпульсних полів. Завдяки їх широкосмуговості досягається майже неспотворене приймання коротких у

часі електромагнітних сигналів. Але чутливість рамкових антен є недостатньою для застосування у радарах підповерхневого зондування, тому що амплітуда сигналів, які треба реєструвати, дуже мала. Внесення феритового стрижня в рамкову антену суттєво підвищує чутливість антени та розширює її робочу смугу.

Метою поданої роботи є виявлення та дослідження фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного електромагнітного поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та використання цих закономірностей для побудови малогабаритних приймальних антен для чутливого неспотвореного приймання електромагнітних імпульсів.

У зв'язку із зазначеним вище тема дисертаційної роботи Огурцової Т. М. «Металеві рамки з феритовим стрижнем як приймальні антени надширокосмугових імпульсних електромагнітних полів» є актуальним дисертаційним дослідженням. Отримані в дисертації результати будуть корисними при визначенні шляхів розвитку радіолокаторів підповерхневого зондування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами і пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки

Дисертаційна робота Огурцової Т. М. є частиною досліджень, що поводяться з метою розвитку вітчизняних систем підповерхневої радіолокації в рамках тематики Національної академії наук України.

Результати роботи увійшли до звітів за 8-ма науково-дослідними роботами, з яких 2 роботи виконувались за програмно-конкурсною тематикою на замовлення. За участю автора дисертації розпочато виконання багаторічного міжнародного проєкту G5731 "Multi-sensor cooperative robots for shallow buried explosive threat detection" за програмою НАТО "Наука заради миру та безпеки", спрямованого на розробку роботизованих систем виявлення мін при гуманітарному розмінуванні, в тому числі і на сході України. Планується використати феритові антени у НШС імпульсному георадарі.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Повний обсяг дисертаційної роботи Огурцової Т. М. становить 155 сторінок і складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 132 найменування, та додатку А.

У вступі автором обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, наведено мету і завдання досліджень, а також об'єкт, предмет та

методи досліджень, визначено ряд невирішених завдань, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети. Наводяться відомості щодо отриманих наукових і практичних результатів, особистого внеску здобувача у дисертаційну роботу, апробації та публікацій отриманих результатів, а також відомості про зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

У першому розділі зроблено огляд наукової літератури за темою дисертаційної роботи. Представлено короткий опис моделей НШС сигналів та їх застосування для вирішення сучасних завдань радіолокації, в тому числі підповерхневої радіолокації. Проведено аналіз існуючих НШС антен, описано їх переваги та недоліки щодо застосування в радарах для підповерхневого зондування. У **першому розділі** також проведено аналіз існуючих способів вимірювання магнітної проникності виробів з фериту. Також приведено основні методи розв'язання задач дифракції нестаціонарних полів на об'єктах, що розглядаються.

Проведений детальний аналіз цих питань дозволив автору обґрунтувати напрямок дисертаційного дослідження, пов'язаний із вивченням фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та використання цих закономірностей для побудови малогабаритних чутливих антен для неспотвореного приймання електромагнітних імпульсів.

Другий розділ присвячений теоретичним дослідженням взаємодії імпульсного поля з нескінченним магнітодіелектричним циліндром кругового перетину. Такий циліндр розглядається як модель стрижня феритової рамкової антени. У розділі наведено строгий розв'язок задачі дифракції плоскої монохроматичної *H*-поляризованої електромагнітної хвилі на обраній перешкоді. Ця задача є базовою для отримання розв'язку задачі дифракції імпульсного *H*-поляризованого електромагнітного поля на нескінченному магнітодіелктричному циліндрі. Збуджуюче поле є імпульсом із гауссовою обвідною та високочастотним наповненням.

Використовуючи розв'язки цієї задачі дифракції, було розраховано імпульси електрорушійної сили, які виникають у замкнутому контурі, яким охоплено циліндр. Після аналізу отриманих графіків, автором було вперше визначено критерії чутливого неспотвореного приймання феритовою антеною НШС сигналів у вигляді імпульсів із гауссовою обвідною та високочастотним наповненням.

Введені ідеалізації при постановці граничної задачі дифракції в частині впливу скінченності довжини циліндра і розсіяних на рамці імпульсних полів були експериментально обґрунтовані.

У **третьому розділі** із застосуванням методу FDTD промодельовано взаємодію імпульсного поля з часовою залежністю у вигляді функцій Гауса та її перших двох похідних з феритовими стрижнями кінцевої довжини та провідними рамками на них. На основі аналізу результатів моделювання було вперше визначено критерії чутливого неспотвореного приймання феритовою антеною гауссових імпульсів та імпульсів із часовою залежністю у формі першої та другої похідної функції Гауса без несучої.

Критерії, одержані у цьому розділі, а також у розділі 2, пов'язують частотні та часові параметри електромагнітних імпульсів, що збуджують, із геометричними й електрофізичними параметрами феритового стрижня.

Отримані критерії сприятимуть створенню конструкцій приймальних антен для розв'язання практичних завдань.

У четвертому розділі запропоновано новий спосіб вимірювання частотної залежності ефективної магнітної проникності феритових стрижнів довільних розмірів та довільного перерізу. Перевагою цього способу є те, що результатом застосування способу є частотна залежність ефективної магнітної проникності для конкретного феритового стрижня.

Завдяки тому, що вимірювання відбуваються з використанням коротких імпульсів електромагнітного поля в обмеженому часовому вікні, досягається мінімізація впливу відбиттів від оточуючого середовища на результати вимірювань, що сприяє точності результатів вимірювань.

Спосіб вимірювання частотної залежності ефективної магнітної проникності феритових стрижнів став основою патенту України на корисну модель (патент України на корисну модель № 126410) та визнаний незалежними експертами.

Розділ 5 присвячений багатоелементним рамковим антенам. У цьому розділі для феритових антен одержала свій розвиток методика підвищення чутливості неспотвореного приймання шляхом підсумовування сигналів, прийнятих кількома рамками. Ця методика враховує взаємний зв'язок між рамками та розмагнічувальний фактор феритового стрижня кінцевої довжини.

Вперше експериментально виявлено, що використання кількох рамок на феритовому стрижні зменшує час наростання перехідної характеристики антени. Зменшення часу наростання перехідної характеристики означає розширення робочої смуги частот антени у бік високих частот і дозволяє реєструвати сигнали коротшої тривалості з підвищеною точністю.

У висновках дисертаційної роботи викладені найбільш важливі наукові і практичні результати, отримані автором.

У додаток А винесено список публікацій здобувача за темою дисертації, у тому числі і дані щодо апробації її результатів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, їхня достовірність

Математичні моделі, що застосовуються автором, відповідають фізичним процесам, що відбуваються при розглянутих у дисертації процесах прийому сигналів НШС імпульсними феритовими антенами і дозволяють підвищити інформаційні можливості радіолокаторів. Результати розрахунків у розділі 2 отримані з використанням строгої постановки задач, яка передбачає аналітичні розв'язки. Спрощення і наближення, прийняті у роботі, обґрунтовані.

Достовірність основних наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується результатами фізичних експериментів.

Наукова новизна дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі Огурцової Т. М. вирішена актуальна задача радіофізики, пов'язана з дослідженням фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного електромагнітного поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та стрижнями з рамками. Вирішення цієї задачі дозволяє створити малогабаритні приймальні антени для чутливого неспотвореного приймання надширокосмугових імпульсів електромагнітного поля.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Визначено критерії чутливого неспотвореного приймання феритовою антеною НШС сигналів у вигляді імпульсів із гауссовою обвідною та високочастотним заповненням, а також гауссового імпульсу й імпульсів у формі 1-ї та 2-ї похідних функції Гауса без несучої, що сприяє створенню практичних конструкцій приймальних антен. Критерії пов’язують частотні та часові параметри імпульсів, що збуджують, із геометричними й електрофізичними параметрами феритового стрижня.

2. Вперше запропоновано спосіб вимірювання частотної залежності магнітної проникності феритових стрижнів із застосуванням коротких імпульсів електромагнітного поля, що дозволяє визначати ефективну магнітну проникність стрижнів довільних розмірів і довільного перерізу та, завдяки спостереженню в обмеженому часовому вікні, усунути вплив відбиттів від оточуючого середовища на результати вимірювань.

3. Розвинуто для феритових антен методику підвищення чутливості неспотвореного приймання НШС імпульсів шляхом підсумовування сигналів, які прийнято кількома рамками. Експериментально показано, що використання двох рамок приводить до збільшення чутливості антени у 1,5 рази, а трьох – у 1,77 рази у порівнянні з однорамковою антеною.

4. Вперше виявлено, що використання у феритовій антені кількох рамок приводить до зменшення часу наростання перехідної характеристики антени і, як наслідок, до розширення її робочої смуги частот у бік високих частот, що дозволяє реєструвати сигнали коротшої тривалості з підвищеною точністю. Для антени з двома рамками час наростання зменшується з 3,6 нс до 2,7 нс, а для антени з трьома рамками – з 3,6 нс до 2,3 нс у порівнянні з однорамковою антеною.

Значущість для науки і практики висновків здобувача

Особливості феритових антени обумовлюються концентрацією електромагнітної енергії у феритовому стрижні, що сприяє збільшенню амплітуди електрорушійної сили, яка наводиться в рамці. Магнітна проникність феритів зменшується на високих частотах, зменшуючи чутливість антени для цих частот. В той же час використання рамки, чутливість якої до низькочастотного сигналу мала, але зростає зі збільшенням частоти, вирівнює амплітудно-частотну характеристику антени. Об'єднання цих механізмів перетворення електромагнітної хвилі в електричний сигнал на виході антени розширює її діапазон робочих частот і робить антену надширокосмуговою. Сама ідея такого об'єднання видається перспективною, важливою і такою, що потребує подальших поглиблених досліджень.

Практичне значення одержаних у дисертації результатів полягає у використанні досліджених закономірностей при створенні феритових надширокосмугових імпульсних антен. У якості найбільш вагомих практичних результатів слід зазначити, що використання феритових стрижнів у рамкових антенах приводить до мінімізації габаритів антени, підвищення її чутливості та розширення робочої смуги антени у бік низьких частот. Використання кількох рамок на феритовому стрижні приводить до розширення робочої смуги частот антени у бік високих частот. Як наслідок, застосування феритових рамкових антен дозволяє підвищити точність результатів НШС імпульсних вимірювань, що для задач підповерхевого зондування означає вищу ймовірність виявлення підповерхневих об’єктів.

Практичне значення. Можливі конкретні шляхи використання результатів дослідження

Результати дисертаційної роботи Огурцової Т. М. можуть бути використаними при створенні перспективних портативних НШС радіолокаторів підповерхневого зондування, у тому числі для системи виявлення і ідентифікації мін різних типів для Збройних Сил України.

Організаціями, зацікавленими у використанні результатів досліджень Огурцової Т. М., можуть бути: підприємства Державного концерну УКРОБОРОНПРОМ; підприємства і науково-дослідні установи, а також фірми, пов'язані із розробкою георадарів для діагностування стану інженерних споруд, покриттів доріг, тощо.

Також отримані результати можуть бути впроваджені науково-дослідними інститутами, які займаються розробкою зразків інженерного озброєння та їх складових, а також військової техніки для Сухопутних військ Збройних Сил України; навчальними закладами, які готують фахівців з радіолокаційного зондування для Сухопутних військ Збройних Сил України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Державного агентства автомобільних доріг України.

Наразі у відділі радіофізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, де проводяться дослідження, спрямовані на створення методів та засобів НШС імпульсного підповерхневого зондування, виконується міжнародний проєкт G5731 "Multi-sensor cooperative robots for shallow buried explosive threat detection" за підтримки програми НАТО "Наука заради миру та безпеки", в результаті якого буде створено портативний георадар для роботизованої платформи. В цьому георадарі передбачається застосування НШС імпульсних феритових антен.

Публікації і апробації результатів дисертаційної роботи, повнота їх викладу

Основні результати дисертаційної роботи Огурцової Т. М. викладено у 4 статтях у фахових виданнях України, в 1 статті у профільному науковому журналі (обліковується у наукометричній базі Scopus), у 1 патенті України, в 7 збірниках доповідей на міжнародних конференціях (обліковуються у Scopus і Web of Science).

Результати досліджень за темою дисертації доповідались на наукових семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, а також на 7 міжнародних конференціях.

Таким чином, основні результати дисертаційної роботи досить повно опубліковані, апробовані і відомі фахівцям. Кількість публікацій та повнота відображення результатів досліджень відповідають встановленим вимогам.

Оформлення і відповідність змісту автореферату та дисертаційної роботи

Оформлення, стиль і мова викладу, обсяг дисертаційної роботи, її структура відповідають встановленим вимогам. Запропоновані рішення викладені аргументовано. Роботу подано з коректним використанням науково-технічної термінології. Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

11. Зауваження по дисертаційній роботі і авторефераті

Однак, необхідно зробити такі зауваження:

1. Не розглянуто похиле опромінення плоскою хвилею феритового стрижня. Отримані результати можуть суттєво вплинути на якісні характеристики антени.
2. Незрозуміло, як впливає застосування ефективної магнітної проникності стрижнів кінцевої довжини на поле, що розсіяне феритовим стрижнем.
3. У 5 розділі дисертації описано методику підвищення чутливості неспотвореного приймання сигналів феритовими антенами з кількома рамками на стрижні. У роботі представлені результати для двох- та трьохрамкових антен. А що буде відбуватися, якщо стрижень охопити більшою кількістю рамок? Якою буде максимальна кількість рамок, щоб приймання було чутливим?

Вказані недоліки не знижують загального позитивного враження від роботи Огурцової Т. М.

Висновок: дисертаційна робота Огурцовою Т. М. є завершеним дослідженням, в якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну наукову задачу, пов'язану з дослідженням фізичних закономірностей процесу взаємодії імпульсного електромагнітного поля нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості з феритовими стрижнями та стрижнями з рамками. Зміст дисертаційної роботи і отримані

результати відповідають паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика та задовольняють вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 року № 567, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а її автор, Огурцова Тетяна Миколаївна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник
Наукового центру Повітряних Сил
Харківського національного університету Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба
Заслужений діяч науки і техніки України
доктор технічних наук професор

О.І. СУХАРЕВСЬКИЙ

01.09.2021

Особистий підпис доктора технічних наук професора О. І. Сухаревського засвідчую.

Заступник начальника
Харківського національного університету Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба
з наукової роботи
Заслужений діяч науки і техніки України
доктор технічних наук професор

Г.В. ПЄВЦОВ

01.09.2021