

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

АХМЕДОВ РОЛАН ДЖАВАДОВИЧ



УДК 537.877

ПОЛЯ ІМПУЛЬСНИХ АНТЕН У  
ЛІНІЙНОМУ ТА НЕЛІНІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩАХ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2021

**Робота виконана** в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Думін Олександр Миколайович**,  
Харківський національний університет імені  
В. Н. Каразіна МОН України, кафедра  
прикладної електродинаміки, доцент.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чурюмов Геннадій Іванович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОН України, кафедра  
фізичних основ електронної техніки,  
професор;

кандидат фізико-математичних наук,  
**Фесенко Володимир Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України,  
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться « 05 » травня 20 21 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий « 01 » квітня 2021р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_

(підпис)

Юрій АРКУША

(ініціали, прізвище)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Дисертаційну роботу присвячено дослідженню процесів випромінювання, поширення й приймання нестационарних електромагнітних хвиль. Поширення хвиль досліджено з урахуванням їхньої нелінійної взаємодії із середовищем.

У ролі джерела поля розглянуто лінзову антену імпульсного випромінювання з круговою апертурою. Хоча антена й знайшла широке застосування в задачах метрології та зондування, її характеристики, особливо в ближній зоні, ще недостатньо вивчено.

Відомо, що напрямленість лінзових антен разом з ефектом електромагнітного снаряда призводить до концентрації енергії в ближній зоні випромінювача. Це явище викликає необхідність враховувати нелінійну взаємодію поля із середовищем поширення при значній амплітуді та крутизні фронту збуджувального імпульсу.

Отже, створення моделі випромінювання імпульсів довільної форми лінзовою антенною з круговою апертурою без спрощень на лінійність середовища дозволить точніше моделювати випромінювання імпульсів з крутими фронтами та великою амплітудою. Уточнена модель процесу випромінювання дозволить поліпшити застосування антени в прикладних задачах. Серед таких задач – визначення ефективної площини розсіювання та передання інформації з цифровим кодуванням.

Інший фактор, що впливає на ефективність застосування короткоімпульсних систем, – це врахування залежності імпульсних характеристик надширококутових антен від напрямку спостереження, особливо в ближній зоні. Виокремлення корисної інформації з електромагнітного імпульсу ускладнено залежністю його форми від точки спостереження. Отже, розвиток методик виокремлення кількісних та якісних характеристик, що несуть корисну інформацію, з нестационарного електромагнітного поля дозволить покращити робочі характеристики імпульсної радіоелектроніки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі прикладної електродинаміки факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна відповідно до планів науково-дослідних робіт: «Моделювання та дослідження нелінійних нанорозмірних систем із нестационарними та гармонійними збудженнями для перетворення полів та створення елементів спінтроники» (номер державної реєстрації: 0114U002585, здобувач – виконавець), «Імпульсні та синусоїдальні поля у нелінійних і шаруватих електродинамічних структурах та наносистемах як перетворювачах полів і моделей елементів спінтроники» (номер державної реєстрації: 0117U004851, здобувач – виконавець), «Електромагнітні поля імпульсних джерел та наноосциляторів в однорідних, шаруватих та нелінійних середовищах» (номер державної реєстрації: 0120U102309, здобувач – виконавець).

Здобувач у межах цього дослідження пройшов стажування в Університеті Мурсії (Іспанія) на факультеті математики за програмою академічної мобільності для здобувачів «Erasmus+» у 2017 році.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження поведінки нестационарного поля в ближній зоні антен, зокрема, з урахуванням нелінійної взаємодії із середовищем, а також вдосконалення методик обробки прийнятих імпульсних надширококустових хвиль за рахунок використання особливостей поля ближньої зони. Задачі дослідження:

1. Отримання перехідної функції лінзової антени імпульсного випромінювання, як явної функції від просторових координат та часу, що справедлива для довільної точки спостереження;
2. аналіз енергетичних та нестационарних властивостей поля лінзової антени імпульсного випромінювання у ближній зоні для імпульсів різної форми;
3. уточнення перехідної функції лінзової антени імпульсного випромінювання для випадку поліноміальної нелінійності середовища;
4. розвиток методики виділення корисної інформації з нестационарного електромагнітного поля за рахунок застосування новітніх методів науки аналізу даних.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітне поле, що випромінюється лінзовою антеною імпульсного випромінювання.

*Предмет дослідження* – вплив ефектів ближньої зони випромінювання і нелінійних ефектів взаємодії поля із середовищем на часову залежність електромагнітних імпульсів та його інформаційну ємність.

**Методи дослідження.** Теоретичну основу дисертації становлять наукові праці вітчизняних та зарубіжних дослідників. Методологічну основу дисертації складають загальнонаукові та спеціальні наукові методи пізнання, серед яких:

1. Метод еволюційних рівнянь у часовій області – метод теоретичної радіофізики, що застосовано для зведення системи рівнянь Максвелла до системи рівнянь відносно скалярних функцій, шляхом неповного розділення змінних за методикою Рімана-Вольтерра.
2. Метод функції Рімана – метод розв'язання неоднорідних диференціальних рівнянь, що застосовано для розв'язку системи еволюційних рівнянь відносно коефіцієнтів розкладу електромагнітного поля по модовому базису.
3. Метод теорії збурень – метод лінеаризації математичних задач, що застосовано для врахування слабкої нелінійності середовища, яку представлено у вигляді поліноміального розкладу вектору поляризації за ступенями напруженості електричного поля.
4. Метод зворотного поширення помилки – метод машинного навчання, що застосовано для розв'язання задачі тренування, а саме для оптимізації параметрів запропонованої моделі виділення корисної інформації з надширококустового радіосигналу.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше отримано властивості поширення нестационарних електромагнітних хвиль, породжених круговою

апертурою в нелінійному керрівському середовищі, що дозволяє оцінити вплив нелінійних ефектів на поодинокий імпульс. Проаналізовано вплив перетворення мод у нелінійному середовищі при самодії поодинокого надширокосмугового електромагнітного імпульсу та встановлено укрупнення фронту імпульсу на осі випромінювання. Врахування нелінійних ефектів проведено на основі аналізу енергетичних властивостей поля в ближній зоні, де густина енергії найбільша.

У ході побудови нелінійної моделі випромінювання автором у першому наближенні побудовано перехідну функцію антен імпульсного випромінювання. Тобто, отримано закон випромінювання нестационарних хвиль у вигляді явної функції всіх просторових координат та часу без наближення дальньої зони, що дозволяє розв'язувати задачі моделювання полялізових та рефлекторних антен імпульсного випромінювання у режимі реального часу.

Запропоновано авторську методику виокремлення корисної інформації з нестационарної імпульсної хвилі, що полягає в застосуванні аналогових рекурентних штучних нейронних мереж задля досягнення підвищеної точності в ближній зоні. Продемонстровано, що запропонована методика дозволяє досягти покращення якості радіоканалу в ближній, проміжній та дальній зонах імпульсних антен. Проведено моделювання задачі цифрової комунікації за запропонованою методикою обробки прийнятного сигналу, де кодування виконано надширокосмуговими наносекундними імпульсами різної форми.

**Практичне значення одержаних результатів.** Дисертаційна робота належить до основних наукових напрямів сучасної радіофізики та визначає тенденції її подальшого розвитку. Напрямок досліджень – теорія випромінювання та приймання нестационарних нелінійних електромагнітних хвиль.

Створено модель антен імпульсного випромінювання в ближній зоні, що покращує результати попередніх досліджень і дозволяє якісніше моделювати процес випромінювання та приймання електромагнітних хвиль із застосуванням такої антени. Врахування нелінійної природи електромагнітного поля дозволяє моделювати поширення високоамплітудних надкоротких імпульсів у різноманітних задачах радіофізики. Описано нові нелінійні ефекти самодії нестационарного імпульсного поля крізь середовище.

До державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» подано заявку на отримання патенту на винахід «Спосіб виокремлення корисної інформації з надширокосмугових (НШС) електромагнітних хвиль» з номером а202004038. Патентним повіреним України з реєстраційним номером 464 проведено аналіз патентоздатності, новизни та технічного рівня об'єкта захисту інтелектуальної власності. Використання розробленої методики дозволяє застосовувати математичні процеси високої складності в реальному часі при незначному споживанні енергії. Гнучкість методики сприяє запровадженню моделей економіки замкненого циклу при виробництві.

Основні отримані в дисертації результати включено до навчальної дисципліни «Випромінювання у часовому просторі», що викладають в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства

освіти і науки України на факультеті радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем студентам IV–V курсів.

**Особистий внесок здобувача.** В роботах [7, 13, 15] здобувач провів аналіз існуючих моделей поля лінзової антени імпульсного випромінювання при довільному нестационарному збудженні і створив модель, що не має недоліків, які спостерігались в аналогічних моделях. Отриманий розв'язок описує поведінку поля в усіх точках простору. Здобувачем проведено порівняння з існуючими моделями і не виявлено розбіжностей, що свідчать про помилковість.

В роботі [3] побудовано поперечні розподіли енергії, а в роботі [4] теоретично обґрунтовано енергетичні згустки, що спостерігаються.

В роботах [1,2,3,8,9,10,11,12,16] здобувач провів аналітичну роботу по врахуванню нелінійної взаємодії нестационарного електромагнітного поля з тривимірним середовищем, подібним за нелінійними властивостями до атмосфери землі. Також здобувач провів числове моделювання процесу нелінійної взаємодії та проаналізував його результати.

Здобувачем запропоновано [14] і теоретично обґрунтовано [6] авторську методику виділення корисної інформації з нестационарної електромагнітної хвилі. Здобувачем проведено числове моделювання [6], що демонструє працездатність та переваги нової концепції.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації були представлені на конференціях і семінарах міжнародного рівня: 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET) (Dnipropetrovsk, 2014), Proc. 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (Kharkiv, 2015) (автор отримав винагороду за кращу доповідь секції), International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) (Kharkiv, 2015), Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (Odessa, 2016), Radio Electronics and Info Communications (Kiev, 2016), 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Kiev, 2017), Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (Odessa, 2018) (робота зайняла 1е місце на конкурсі робіт молодих вчених), 2017 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Lviv, 2019), 2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED) (Lviv, 2019), 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) (Kharkiv, 2020).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано у 17 наукових працях, серед яких – 6 статей у наукових фахових виданнях України, одну статтю опубліковано у науковому виданні, що входить до наукометричної бази даних Scopus. Також опубліковано 10 тез доповідей на конференціях міжнародного рівня і подано заяву на отримання патенту до Українського інституту інтелектуальної власності, яка станом на кінець 2020 року проходить кваліфікаційну експертизу.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок, з яких 120 сторінок основного тексту.

Список використаної літератури містить 122 найменування. Усього в дисертації 42 рисунки та 2 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та проведено декомпозицію наукових завдань. Сформульовано об'єкт, предмет, методи досліджень, наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячено огляду методів, що застосовуються в задачах випромінювання, поширення та приймання надширокосмугових електромагнітних хвиль з урахуванням її нелінійної взаємодії з середовищем. В цьому розділі деталізується напрямок дослідження та визначаються споріднені для нього наукові течії.

Основною метою другого розділу є визначення аналітичного закону поширення поля в ближній зоні антени з припущенням лінійності взаємодії поля з середовищем задля подальшого використання отриманого закону для розвитку нелінійної теорії поля. У явному вигляді і без наближення дальньої зони розв'язано задачу випромінювання імпульсу з довільним часовим фронтом лінзовою антеною імпульсного випромінювання.

На Рис. 1 зображено модель однієї з реалізацій лінзової антени імпульсного випромінювання, яка складається з округленого TEM рупора, який використовується для живлення еліптичної діелектричної лінзи, що повністю заповнює металевий рупор.

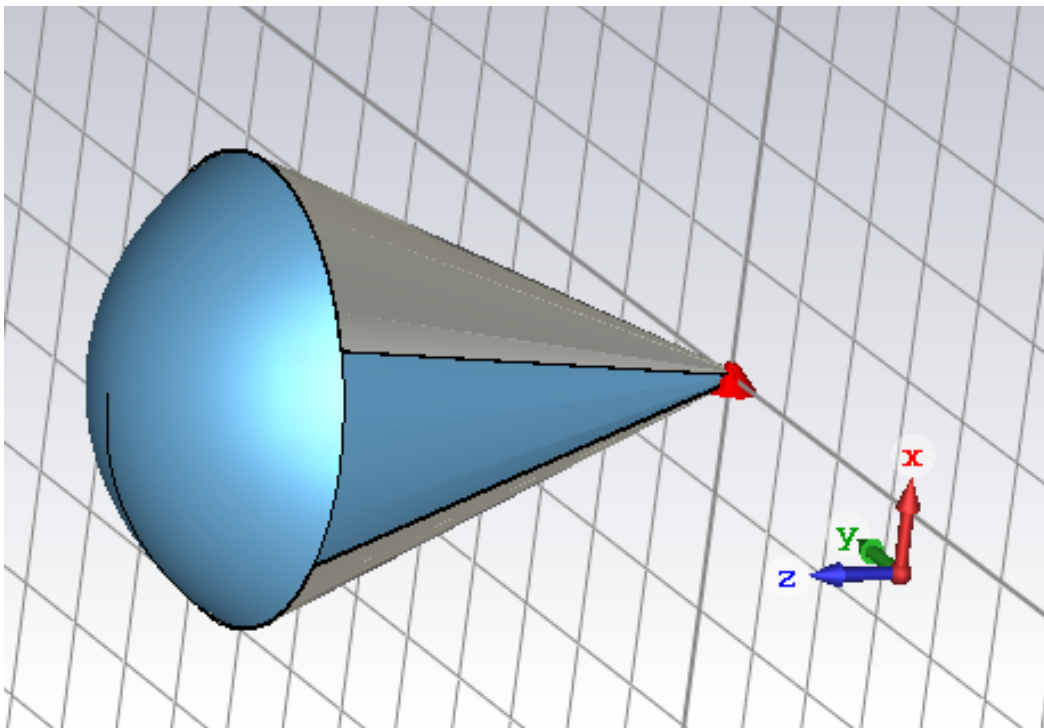


Рисунок 1. Модель лінзової антени імпульсного випромінювання з повним заповненням однорідним діелектриком

Принцип роботи цієї антени базується на формуванні кругової поверхні рівних фаз з деяким радіусом  $R$  у широкому спектрі частот. Лінза має круговий поперечний перетин та геометрично може бути представлена, як перетин конуса з кутом розкриття  $\pi/2$  та еліпсоїда з напівосями  $r_x, r_y, r_z$ , що мають наступне співвідношення:

$$\frac{r_z^2}{r_x} = \frac{r_z^2}{r_y} = R,$$

де  $R$  радіус уявного диску, що одночасно збуджується по всій площині. Як показують експериментальні дослідження Баума та Ву, у першому наближенні така антена може бути представлена круговим пласким однонапрямленим розподілом електричного струму:

$$\vec{J}_0(\vec{r}, t) = \vec{x}_0 A_0 f(t) (H(\rho) - H(\rho - R)), \quad (1)$$

де  $A_0$  – максимальна амплітуда електричного струму.

Часова залежність розподілу струму збудження враховується за допомогою інтегралу Дюамеля і перехідної функції, тобто поля від розподілу струму  $\vec{J}_0(\vec{r}, t)$  з часовою залежністю у вигляді ступеневої функції Хевісайда.

Для визначення перехідної функції електричного і магнітного полів було застосовано метод еволюційних рівнянь в циліндричній системі координат. В ході розв'язання встановлено, що поле має чітку просторово-часову зональність, яка обумовлена принципами причинності і суперпозиції. Отримані області випромінювання  $S_1, S_2, S_3$  наступають послідовно в часі для довільної точки спостереження у тривимірному просторі:

$$\begin{aligned} S_1 &\subset 0 < \frac{c^2 t^2}{\epsilon \mu} - z^2 < (\rho - R)^2; \\ S_2 &\subset (\rho - R)^2 < \frac{c^2 t^2}{\epsilon \mu} - z^2 < (\rho + R)^2; \\ S_3 &\subset (\rho + R)^2 < \frac{c^2 t^2}{\epsilon \mu} - z^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Остання за часом настання для деякої просторової точки спостереження область  $S_3$  відповідає стаціонарному (усталеному) процесу випромінювання, коли всі точки апертури поєднані зі спостерігачем за принципом причинності. Настанню усталеного процесу передують області деякого транзитивного процесу  $S_2$ , поки поле від всієї апертури не досягне спостерігача. Найпершою для спостерігача просторово-часовою областю випромінювання в прожекторній зоні круглої апертури настає область електромагнітного снаряду  $S_1$ , де з хвилі у ТЕМ рупорі формується ТЕ хвиля у вільному просторі. Отримана зональність дозволяє



визначити тривалість імпульсу  $\tau$ , як функцію тривалості струму збудження  $\tau_0$  при його довільній часовій залежності:

$$\frac{c\tau}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c\tau_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} + \sqrt{(\rho + R)^2 + z^2} - \begin{cases} z, & \rho < R \\ \sqrt{(\rho - R)^2 + z^2}, & \rho > R \end{cases}$$

Отримана перехідна функція  $\vec{\mathbf{E}}_0$  представлена у вигляді кускововизначеної векторної функції явного виду від чотирьох змінних – три просторові координати і час:

$$\vec{\mathbf{E}}_0(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} E_\rho \\ E_\varphi \\ E_z \end{pmatrix} = \frac{A_0}{2} \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\epsilon_0\epsilon}} \begin{pmatrix} I_1(t, \rho, z) \cos \varphi \\ [I_2(t, \rho, z) - I_1(t, \rho, z)] \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де кускова область визначення прихована у введених означеннями  $I_1$  та  $I_2$ :

$$I_1\{S_1\} = 2 \cdot I_2\{S_2\} = 1$$

$$I_1\{S_3\} = I_2\{S_3\} = 0$$

$$I_1\{S_2\} = \frac{\rho^2 + R^2}{4\pi\rho^2} \arccos \frac{\frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} - z^2 - \rho^2 - R^2}{2\rho R} - \frac{\sqrt{4\rho^2 R^2 - \left(\rho^2 + R^2 - \frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} + z^2\right)^2}}{4\pi\rho^2} -$$

$$- \frac{|\rho^2 - R^2|}{4\pi\rho^2} \arctg \sqrt{\frac{(\rho - R)^2 (\rho + R)^2 - \frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} + z^2}{(\rho + R)^2 \frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} - z^2 - (\rho - R)^2}}$$

$$I_2\{S_2\} = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{\frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} - z^2 + \rho^2 - R^2}{2\rho \left(\frac{c^2 t^2}{\epsilon\mu} - z^2\right)}.$$

Отримана перехідна функція  $\vec{\mathbf{E}}_0$  дозволяє оцінити мінливість фронту імпульсу у ближній зоні і побудувати поле антен імпульсного випромінювання у першому наближенні з довільною часовою залежністю збудження, що важливо для оцінки впливу нелінійності на процес формування електромагнітного снаряду.

На Рис. 2 схематично зображено форму імпульсів, що можуть спостерігатись у ближній зоні в окремих точках спостереження: а саме при  $\varphi = 0, \frac{2\pi}{3}, \frac{\pi}{2}$  та  $\rho = \frac{R}{2}, 2R$  з фіксованою поздовжньою координатою  $z = 2R$ . Сірим

$0, \frac{2\pi}{3}, \frac{\pi}{2}$  та  $\rho = \frac{R}{2}, 2R$  з фіксованою поздовжньою координатою  $z = 2R$ . Сірим кольором на схемі позначено площину кругового розподілу електричного струму, тобто апертури джерела.

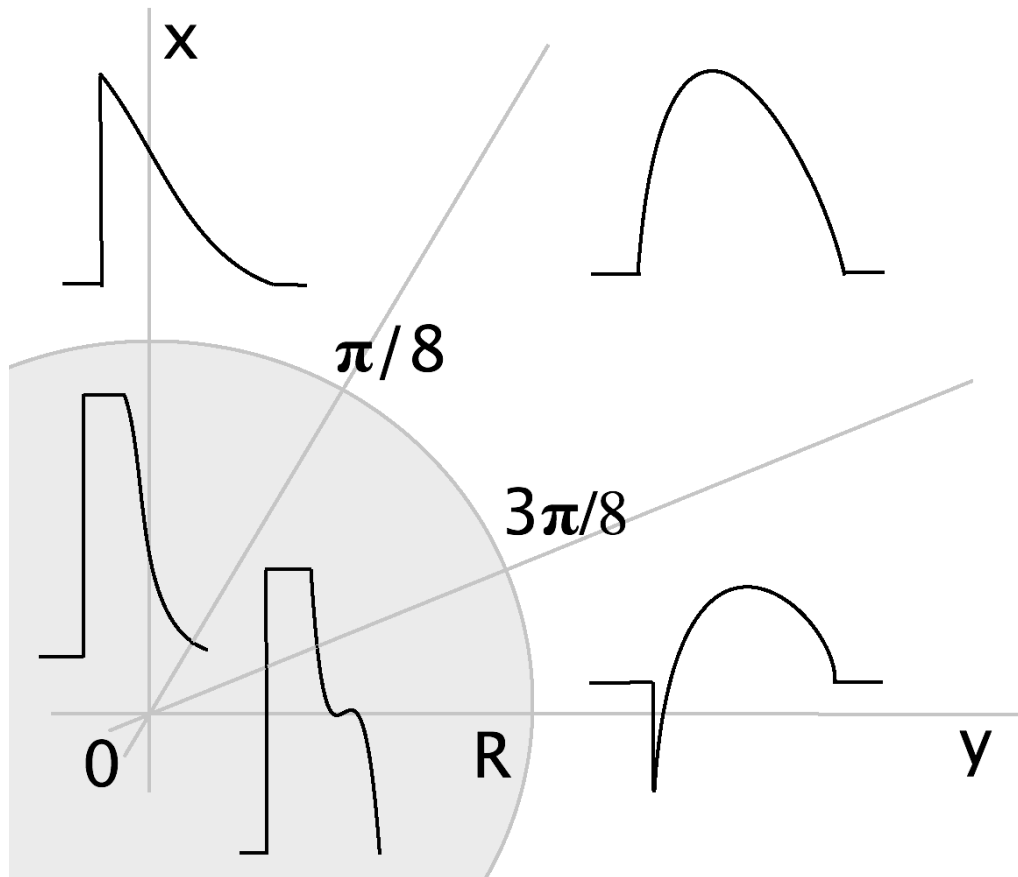


Рисунок 2. Напруженість поля в залежності від напрямку спостереження.

Аналіз отриманої перехідної функції магнітного поля антен імпульсного випромінювання дозволив оцінити швидкість згасання амплітуди статичного магнітного поля у ближній зоні, яке виникає внаслідок збудження антени струмом сталої амплітуди та нескінченної тривалості. За допомогою порівняння поздовжньої магнітної компоненти  $H_z$  та поперечної електричної компоненти  $E_x$  можна продемонструвати зв'язок ефекту електромагнітного снаряду з формуванням електромагнітної хвилі.

На Рис. 3 бачимо, що компонента  $H_z$  починається з затримкою відносно компоненти  $E_x$ , а тривалість затримки співпадає з тривалістю ефекту електромагнітного снаряду. Плаский диск струму є апроксимацією TEM джерела, а у вільному просторі поздовжня компонента повинна існувати, таким чином, затримку поздовжньої компоненти можна розуміти, як процес формування хвилі у вільному просторі з TEM хвилі у рупорі.

**Третій розділ** присвячено оцінці впливу керрівської нелінійності на поширення поодинокого імпульсу породженого рівномірним однонаправленим розподілом електричного струму у формі плаского диску. У якості часової залежності збудження розглянуто функцію Хевісайда, що відповідає фізичному процесу вмикання постійного струму живлення.

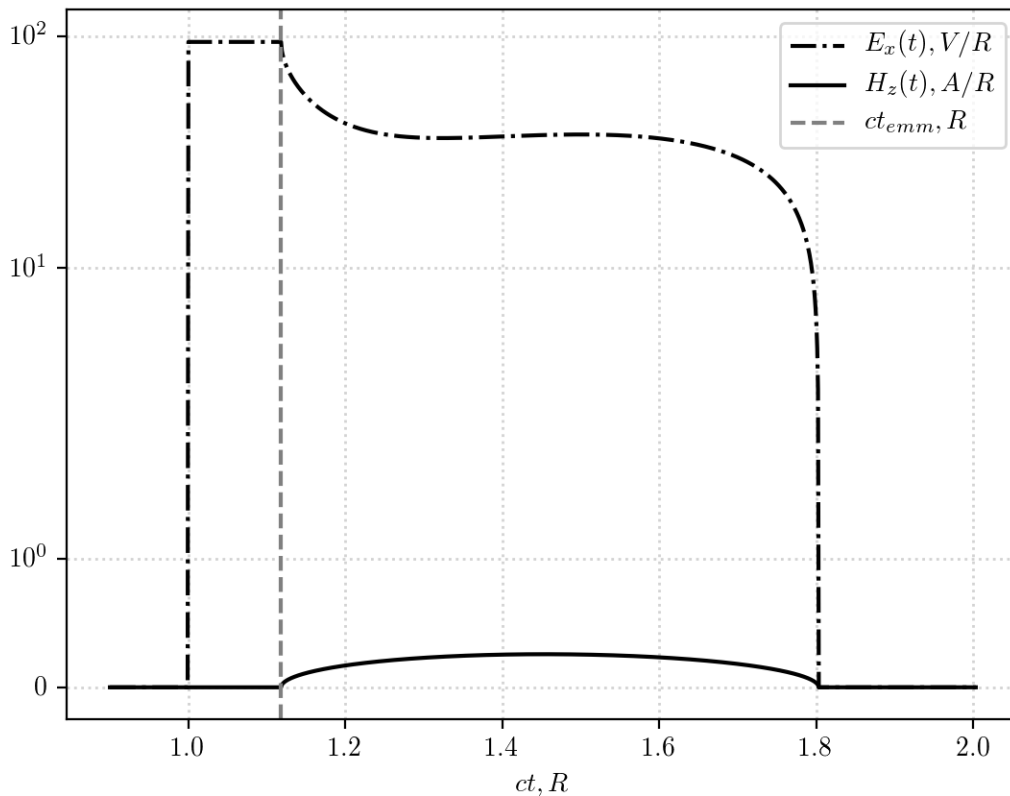


Рисунок 3.  $E_x$  і  $H_z$  в точці  $\rho = \frac{R}{2}$ ,  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $z = R$

Отримана перехідна функція у лінійному випадку дозволяє проілюструвати розподіл енергії у ближній зоні, що важливо при визначенні необхідності врахування нелінійних механізмів взаємодії поля з середовищем.

На Рис. 4 зображено поздовжні ортогональні зрізи густини енергії. Темніший колір означає більше значення густини енергії.

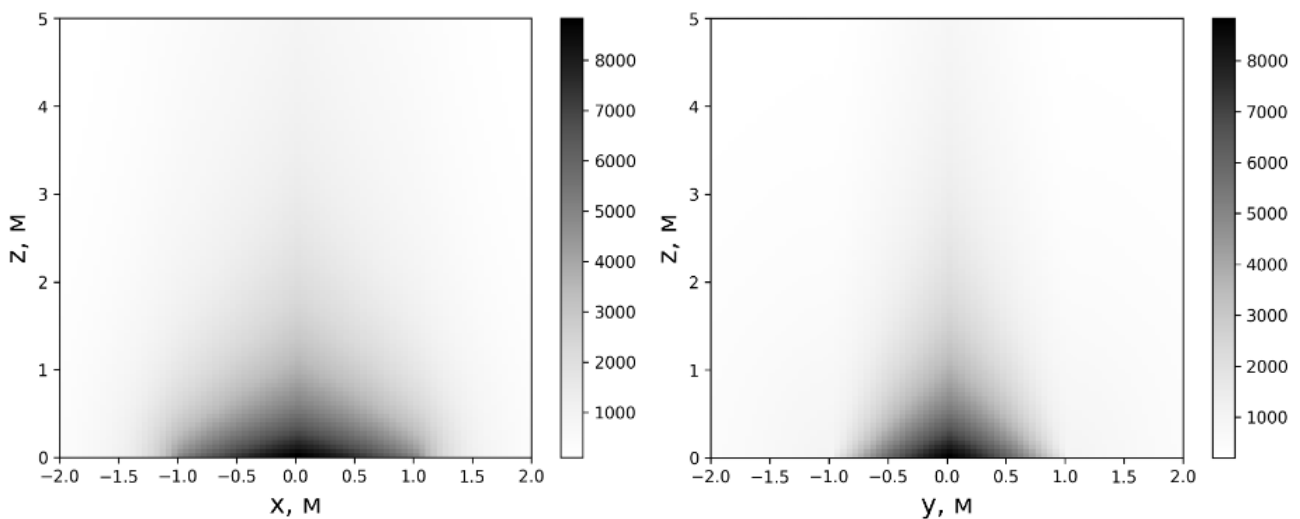


Рисунок 4. Розподіл густини енергії поля LIRA у поздовжніх зрізах XOZ (зліва) та YOZ (справа)

Помічаємо, що енергія випромінювання концентрується поблизу поверхні джерела і вздовж осі випромінювання, що обумовлено ефектом електромагнітного снаряду. Для побудови графіку часову залежність розподілу струму прийнято у вигляді функції Хевісайда, а радіус диску  $R = 1$  м. Також спостерігаємо поступове згасання густини енергії з відстанню від джерела в усіх напрямках, що свідчить про виконання закону збереження енергії отриманого аналітичного розв'язку. В роботі кількісно оцінено концентрацію енергії у ближній зоні. Виявлено, межі області простору, в якій спостерігається квазі-рівномірний розподіл електромагнітної енергії.

Врахування нелінійності електродинамічної моделі виконано в матеріальних рівняннях середовища. В постановці задачі знехтувано дисперсійними втратами, а також втратами провідності середовища. Застосовано спрощення слабонелінійного середовища, а вектор поляризації представлено у вигляді розкладу в ряд Тейлора. Зважаючи на зменшення внеску кожного наступного доданку використовується лише перший нелінійних доданок розкладу вектору електричної індукції. В результаті перерахованих спрощень та припущень отримано нелінійний вектор поляризації

$$\vec{P} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} + \epsilon_0 \chi_3 \vec{E}^3,$$

де  $\epsilon_0 \epsilon$  – абсолютна діелектрична проникність середовища, а  $\epsilon_0 \chi_3$  – абсолютна нелінійна електрична сприйнятливості. Середовище з такими властивостями називають керрівським. Згідно наявних експериментальних досліджень так може бути змодельоване, в тому числі і діелектричне слабопровідне розріджене газоподібне середовище, за умовою, якщо енергії наносекундного імпульсного випромінювання достатньо лише для прояву нелінійності, яку зумовлено молекулярними явищами.

Для розв'язання задачі поширення в часовій області використано теорію збурень, отже кожен доданок вектору поляризації розглядається в індивідуальній задачі випромінювання, а розв'язок шукається у вигляді суперпозиції:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}',$$

де в якості джерела для  $\vec{E}_0$  виступає плаский диск  $\vec{J}_0(r, t)$ , а джерелом для  $\vec{E}'$  виступає просторовий розподіл електричного струму, який зумовлено нелінійною індуктивною реакцією в середовищі Керра

$$\vec{j}' = \frac{\chi_3}{c} \frac{d\vec{E}_0^3}{dt}.$$

Основний результат другого розділу дисертації складає аналіз аналітичного запису інтенсивності поля-поправки  $\vec{E}'$ , яку в цьому ж розділі отримано методом еволюційних рівнянь.  $\vec{E}'$  представлено у вигляді векторної кусково-визначеної функції координат точки спостереження та часу, яка містить залежність від

азимутального кута в явному виді та містить кратний невластний інтеграл, що визначає залежність від аргументів  $\rho, z, t$ :

$$\vec{E}'(\vec{r}, t) = \begin{Bmatrix} E'_\rho \\ E'_\varphi \\ E'_z \end{Bmatrix} = \frac{\epsilon_0 \chi_e^{(3)} A_0^3 v'}{2^7 v} \left( \frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon} \right)^2 \begin{Bmatrix} \hat{E}_\rho^{(1)} \cos \varphi + \hat{E}_\rho^{(3)} \cos 3\varphi \\ \hat{E}_\varphi^{(1)} \sin \varphi + \hat{E}_\varphi^{(3)} \sin 3\varphi \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

де  $v'$  - швидкість світла в середовищі з урахуванням нелінійної сприятливості,  $v$  - швидкість світла у лінійному наближенні взаємодії поля з середовищем, а

$$\hat{E}_\rho^{(m)} = \hat{E}_\rho^{(m)}(v|vt, \rho, z) = - \int_0^\infty v dv \widehat{V}_m^h(v|vt, \rho, z) \frac{J_m(v\rho)}{v\rho},$$

$$\hat{E}_\varphi^{(m)} = \hat{E}_\varphi^{(m)}(v|vt, \rho, z) = \int_0^\infty v dv \widehat{V}_m^h(v|vt, \rho, z) (J_{m-1}(v\rho) - J_{m+1}(v\rho)),$$

де

$$\widehat{V}_m^h = \int_0^\infty dz' \left\{ \begin{array}{l} J_0 \left( v \sqrt{2v't(z+z') - 2z^2} \right) \widehat{J}_m(v't - z + z', z') - \\ - \int_0^\infty v'(t-t') \frac{J_1 \left( v \sqrt{v'(t-t')^2 - (z-z')^2} \right)}{\sqrt{v'(t-t')^2 - (z-z')^2}} \widehat{J}_m(v't', z') dt' \end{array} \right\},$$

де

$$\widehat{J}_1(t, z) = \int_0^\infty \rho d\rho (J_0(v\rho)(3\alpha + \beta + 3\gamma + \lambda) + J_2(v\rho)(3\alpha + \beta - 3\gamma - \lambda)),$$

$$\widehat{J}_3(t, z) = - \int_0^\infty \rho d\rho (J_2(v\rho)(\alpha - \beta - \gamma + \lambda) + J_4(v\rho)(\alpha - \beta + \gamma - \lambda)),$$

де

$$\alpha(vt, \rho, z) = 2I_1^2 \frac{\partial I_1}{\partial t},$$

$$\beta(t, \rho, z) = (I_2 - I_1) \left( \frac{\partial I_1}{\partial t} (I_2 - I_1) + 2I_1 \left( \frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right) \right),$$

$$\gamma(t, \rho, z) = I_1^2 \left( \frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right) + 2I_1 \frac{\partial I_1}{\partial t} (I_2 - I_1),$$

$$\lambda(t, \rho, z) = I_1^2 \left( \frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right) + 2I_1 (I_2 - I_1),$$

де

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_1\{S_2\}}{\partial t} = \frac{vt}{2\pi\rho^2} \frac{(\rho^2 - R^2)^2 (v^2 t^2 - z^2)^{-1}}{\sqrt{(\rho + R)^2 - (v^2 t^2 - z^2)} \sqrt{(v^2 t^2 - z^2) - (\rho - R)^2}} - \frac{vt}{2\pi\rho^2} \frac{2(\rho^2 + R^2) - (v^2 t^2 - z^2)}{\sqrt{4\rho^2 R^2 - (v^2 t^2 - z^2 - \rho^2 - R^2)^2}},$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_2\{S_2\}}{\partial t} = \frac{vt}{\pi(v^2 t^2 - z^2)} \frac{v^2 t^2 - z^2 - \rho^2 + R^2}{\sqrt{4\rho^2(v^2 t^2 - z^2) - (v^2 t^2 - z^2 + \rho^2 - R^2)^2}}$$

Функції  $\hat{E}_\rho^{(m)}$  та  $\hat{E}_\varphi^{(m)}$  безрозмірні та мають область значень в межах  $[-1; 1]$ , а спільний для всіх компонент поля  $\vec{E}'$  амплітудний множник дозволяє оцінити у першому наближенні вплив нелінійності на вид імпульсного поля. Амплітудний множник для векторної функції (4) містить множник  $v'/v < 1$ , тобто бачимо вплив електромагнітних властивостей середовища на амплітуду поля. Також в амплітудному множнику присутня кубічна амплітуда поля у лінійному наближенні. В ході розв'язання виявлено, що врахування слабкої нелінійності не викликає появу нових компонентів імпульсного ТЕ поля.

Поперечні компоненти поля мають досить просту залежність від азимутального кута точки спостереження – окрім типової для апертурних джерел двохпелюсткової залежності з'являється ще і шестипелюсткова, яка має на порядок менший внесок, але несе досить сильний паразитний вплив на напрямлені характеристики антени. Така кутова залежність з'явилась в виразі для поля поправки (4) через виникнення дискретних просторових мод вищого порядку у подовому розкладі джерела:  $\hat{j}_3(t, z)$  та  $\hat{j}_{-3}(t, z)$ .

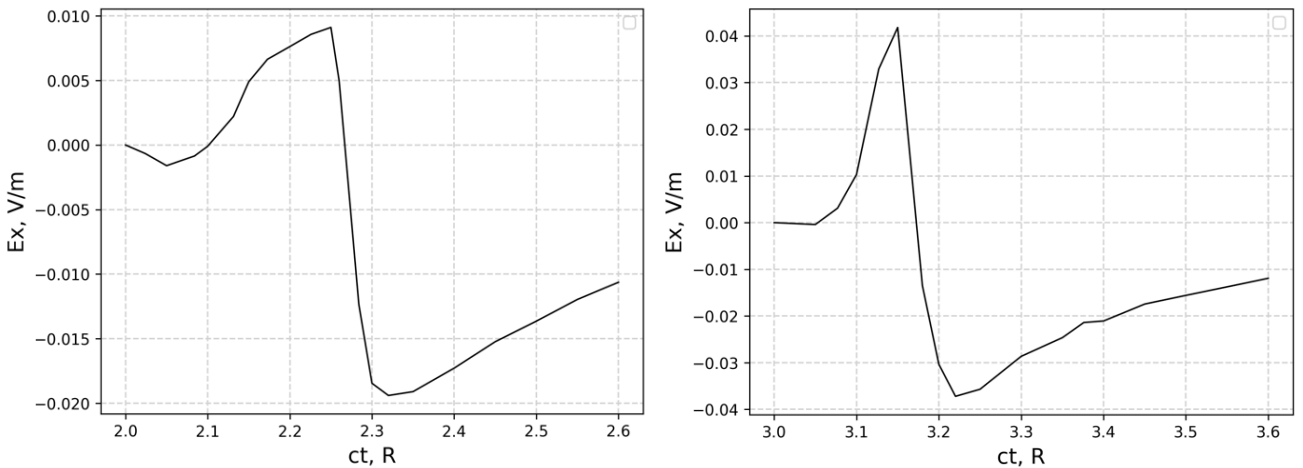


Рисунок 5. Нелінійна поправка до поля на осі випромінювання при  $z = 2\text{м}$  (зліва) та  $z = 3\text{м}$  (справа)

На Рис. 5 зображено інтенсивність  $E_x$  компоненти імпульсного поля поправки в двох послідовних моментах поширення. З графіків видно, що дисперсія імпульсу зменшується, а крутизна його фронтів і максимальна амплітуда зростають. Цей ефект відомий в літературі, як ефект нелінійного самофокусування імпульсу. Зростання амплітуди з віддаленням точки спостереження від плоского диску електричного струму, викликає сумніви щодо виконання закону збереження енергії в отриманому результаті. Це можна пояснити нехтуванням дисипативними і дисперсійними властивостями середовища. Також, важливим фактором стало те, що джерело поля не диск, а просторовий розподіл електричного струму, в межах якого розташовано точки спостереження. Нагадаємо, що просторово розподіл вторинного електричного струму штучно обмежено областю концентрації енергії. З огляду на зроблені спрощення, припустимо, що на нескінченності амплітуда поля зменшується і закон збереження енергії не порушується. З графіків видно, що тривалість нелінійного поля поправки порядку декількох наносекунд, також спостерігаємо саме двохпелюстковий імпульс, що очікувано при однополюсному збудженні  $\vec{j}'$ , на підставі чого можна припустити, що збільшення кількості порохованих точок для графіків задля точнішого дослідження доімпульсних та післяімпульсних коливань – не доцільне.

У четвертому розділі розглядається проблематика обробки надширокосмугових імпульсів в різноманітних задачах радіофізики, а саме способи розв'язання задач класифікації і маркування неперервних часових послідовностей. Обґрунтовано складність класифікації детектованого електричного струму з урахуванням спотворення фронту імпульсу у ближній зоні і в умовах багатокористувацького середовища.

У якості прикладу спостережень, класифікація яких у ближній зоні ускладнюється, приведено електричне поле лінзової антени імпульсного випромінювання, яка збуджується струмами з часовими залежностями у вигляді гаусіана та похідної від гаусіана.

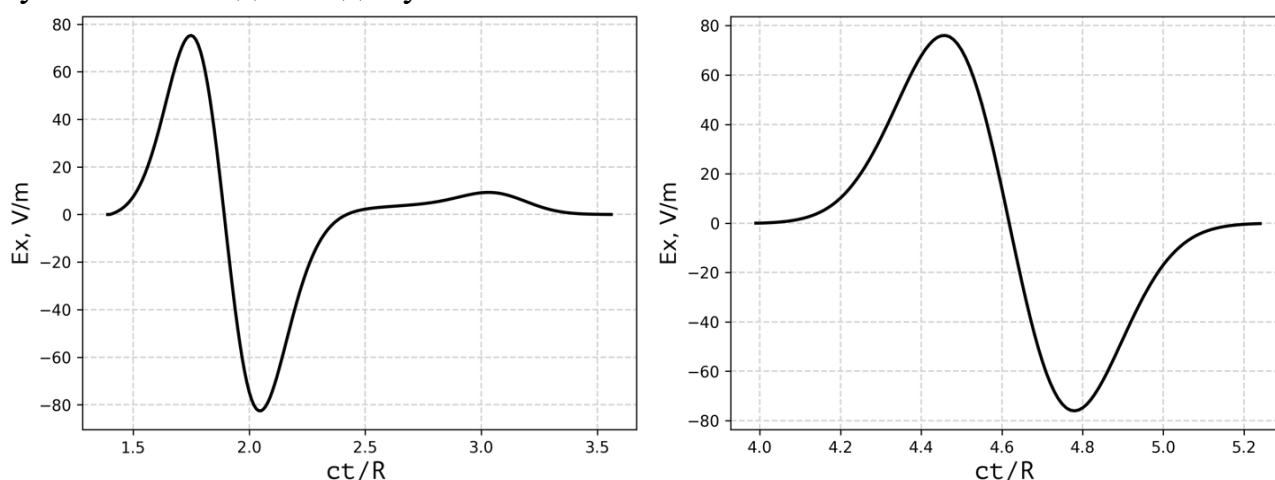


Рисунок 6. Електричне поле антени типу LIRA збуджене струмом з різними часовими залежностями: гаусіан (справа) та похідна від гаусіана (зліва)

На Рис. 6 зображено напруженість електричного поля, що породжено LIRA із часовою залежністю збудження у формі функції Гауса (справа), та у формі її похідної (зліва). Рисунок ілюструє, що в ближній зоні можна знайти такі точки спостереження, де різне збудження породить поле майже однакового вигляду. В роботі виявлено, що спостерігаючи поле збуджене, струмом з часовою залежністю у вигляді похідної гаусіана в точці  $\rho = R/2, \varphi = \pi/4, z = R$  електромагнітний імпульс матиме такий вигляд, наче ми спостерігаємо імпульс, збуджений іншим струмом. Невелика різниця між формами сигналів може легко губитись в шумах та зробить процес розрізнення імпульсів стандартними алгоритмами FPGA, на кшталт фільтру Кауфмана, неможливим.

Задля вирішення вищезгаданих проблем запропонована авторська методика виділення корисної інформації за допомогою фізичної нейронної мережі структурним елементом якої є тривала короткострокова пам'ять або мережа-трансформер. Таким чином задачу виділення корисної інформації з сигналу розв'язано кібернетичним підходом з застосуванням електродинамічної теорії та математичного апарату науки про дані.

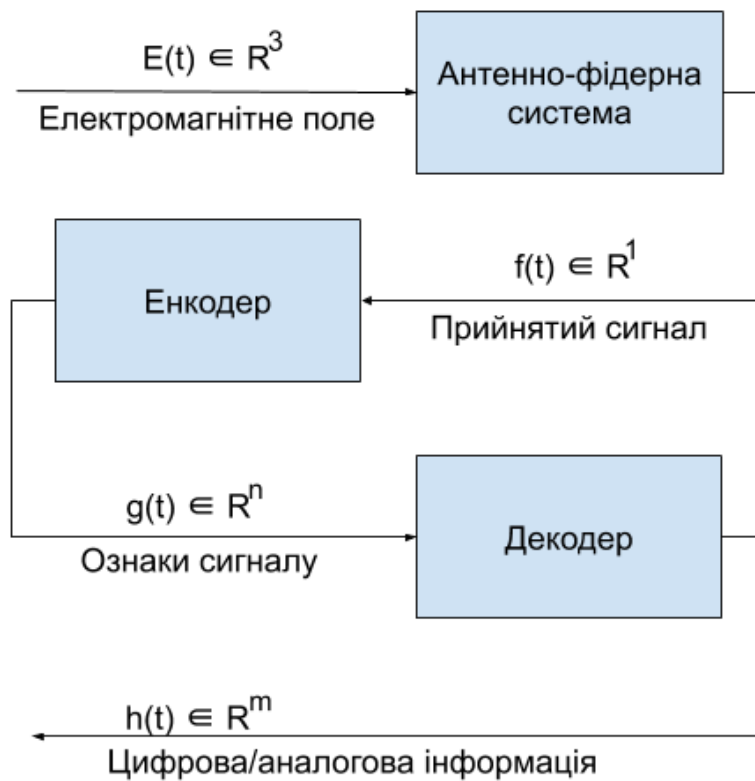


Рисунок 7. Структурна схема процесу виокремлення корисної інформації з імпульсних надширококустових хвиль

На Рис. 7 схематично зображено процес виділення корисної інформації. В якості вхідних даних для фізичної нейронної мережі використовується масштабно-часове перетворення від електромагнітної хвилі у вільному просторі. При потраплянні на вхідний структурний елемент штучної нейронної мережі (енкодер) сигнал перетворюється на його багатовимірну унікальну характеристику і передається на вихідний компонент мережі (декодер) у вигляді



електричних струмів. Декодер трансформує проміжні дані у кількісну або якісну характеристику яку несла отримана електромагнітна хвиля. Так для задачі передачі інформації вихідний струм визначає приналежність сигналу до певного типу. Кінцеві характеристики структурних елементів на їх функції передачі визначаються в процесі тренування, заснованому на стохастичному методі зворотного поширення похибки спрямованому на оптимізацію значення цільової функції.

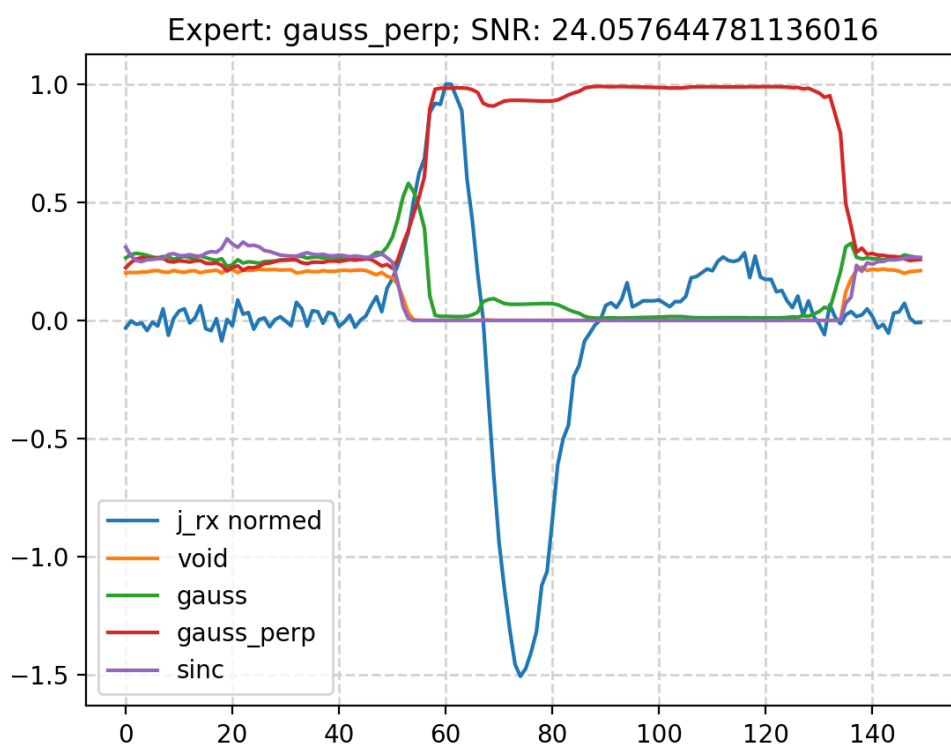


Рисунок 8. Приклад застосування запропонованої методики для розв'язання задачі класифікації короткого імпульсу в умовах каналу з завадами та багатокористувацького середовища

Рис. 8 демонструє здатність нейронного радіо до розрізнення сигналів різного типу, які зображено на Рис. 7. Шкала за віссю абсцис показує порядковий номер дискретного значення, що застосовується для числового моделювання проведеного в дисертації. Синя лінія демонструє вхідну нормовану напруженість електричного струму. Червона, помаранчева, зелена та фіолетові лінії симулюють вихідні струми радіоприймального обладнання, а амплітуди цих кривих в кожен момент часу визначають імовірність приналежності сигналу до певного класу. Бачимо, що значення червоної кривої яка відповідає дійсному класу сигналу демонструє стійку вірну класифікацію.

В фінальному розділі дисертації доведено, що застосування описаного підходу дозволяє досягти покращення якості радіоканалу у ближній, проміжній та дальній зонах імпульсних антен при складних радіоумовах: низький SNR, багатокористувацьке середовище, перевідбиття первинного імпульсу, накладання імпульсів один на один.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу випромінювання електромагнітного поля нестационарним розподілом електричного струму у формі плаского диску з урахуванням ефектів нелінійності, а також актуальне наукове завдання розробки методики демодуляції нестационарного імпульсу з урахуванням ефектів ближньої зони. На підставі цього було зроблено такі висновки:

1. Побудовано аналітичне розв'язання у вигляді кусково-визначеної функції для задачі випромінювання круглої апертури при нестационарному збудженні у вигляді прямокутної функції. Розв'язок отримано без наближення дальньої зони та визначено для всіх точок спостереження в кожен момент часу. Використання моделі круглої апертури, як моделі антен типу LIRA, перевірено на експериментальних даних в окремих точках та на даних, отриманих методом FDTD з комерційного електромагнітного симулятора CST Studio.
2. Отримане розв'язання задачі випромінювання плаского диску при збудженні у вигляді функції Хевісайда в лінійному наближенні має чітку просторово-часову зональність та ілюструє твердження Фарадея, що випромінює не антена, а простір довкола неї. Отримані області випромінювання настають послідовно для довільної точки спостереження. Остання за часом настання область  $S_3$  відповідає стаціонарному (усталеному) процесу випромінювання, коли всі точки апертури поєднані зі спостерігачем за принципом причинності. Настанню усталеного процесу передують області деякого транзитивного процесу  $S_2$ , поки поле від всієї апертури не досягне спостерігача. Найпершою для спостерігача просторово-часовою областю випромінювання в прожекторній зоні круглої апертури настає область електромагнітного снаряду  $S_1$ , де з хвилі у TEM рупора формується TE хвиля у вільному просторі.
3. При урахуванні нелінійних ефектів самодії у керрівському середовищі, квазі-плаский фронт хвилі, що формується пласким диском електричного струму, за своєю формою наближається до сферичного. При цьому, тип хвилі зберігається і хвиля з урахуванням нелінійних ефектів залишається поперечною електричною (TE).
4. Нейронне радіо дозволяє на практиці реалізувати максимальний теоретичний потенціал імпульсних надширококутових радіосистем у всіх областях застосування: радіолокації, телекомунікації, зондування тощо. Головними перевагами таких систем в порівнянні з класичними є енергоефективність, а також якість розв'язання задач sequence-to-label і sequence-to-sequence за рахунок гнучкості системи. Даний винахід розширює область застосування імпульсного радіо за рахунок покращених робочих характеристик. Підвищена стійкість до шуму дозволяє вирішувати радарні та телекомунікаційні задачі на більших відстанях. Можливість розпізнавати імпульси різної форми збудження уможливорює кодування корисного сигналу імпульсами різної форми, що підвищує швидкість передачі даних.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці у наукових фахових виданнях України:*

1. Dumin, O. M., Tretyakov, O. A., Akhmedov, R. D., Dumina, O. O.: Evolutionary Approach for the Problem of Electromagnetic Field Propagation Through Nonlinear Medium. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка» **24**, 23–28 (2015) *Внесок здобувача: Аналітична робота по доказу та виведенню математичних співвідношень. Аналіз отриманих результатів.*
2. Думін, О. М., Ахмедов, Р. Д.: Міжмодове перетворення нестационарного електромагнітного поля в нелінійному необмеженому середовищі. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка» **26**, 42–47 (2017) *Внесок здобувача: Отримання модового розкладу поля у відкритому просторі методом еволюційних рівнянь. Статистична обробка отриманих результатів.*
3. Думін, О. М., Ахмедов, Р. Д.: Випромінювання та розповсюдження електромагнітного снаряду в нелінійному середовищі. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка» **27**, 37–42 (2017) *Внесок здобувача: Застосування теорії збурень для врахування нелінійних складових поляризації*
4. Думін, О., Ахмедов, Р., Черкасов, Д.: Імпульсне випромінювання антени з круговою апертурою в ближній зоні. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка» **28**, 30–33 (2018) *Внесок здобувача: Підготовка графічних матеріалів до публікації. Аналітична робота над математичним апаратом методу еволюційних рівнянь.*
5. Думін, О. М., Ахмедов, Р. Д., Черкасов, Д. В.: Поширення імпульсної електромагнітної хвилі в керрівському середовищі. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. «Радіофізика та електроніка» **29**, 11–16 (2018) *Внесок здобувача: Розв'язання системи рівнянь Максвелла з урахуванням нелінійних властивостей середовища для неоднорідності у вигляді плаского диску з електричним струмом.*
6. Ахмедов, Р. Д.: Виокремлення корисної інформації з надширококутної хвилі у ближній зоні випромінювання. «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» **3-4**, 3–10 (2020) *Внесок здобувача: Розробка авторської методики виділення корисної інформації з імпульсної надширококутної електромагнітної хвилі, проведення числових симуляцій процесу випромінювання-поширювання-приймання імпульсів з урахуванням розробленої методики.*

***Наукові праці у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:***

7. **Akhmedov, R.**, Dumin, O., Katrich, V.: Impulse radiation of antenna with circular aperture. *Telecommunications and Radio Engineering* **77**. 1767–1784 (2018) *Внесок здобувача: Розв'язання задачі випромінювання імпульсу довільної геометричної форми лінзовою імпульсною антеною з круговою апертурою. Аналітична робота по отриманню перехідної функції для ближньої зони, як явної функції від просторових координат та часу.*

***Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:***

8. Dumin, O., Katrich, V., **Akhmedov, R.**, Tretyakov, O., Dumina, O.: Evolutionary approach for the problems of transient electromagnetic field propagation in nonlinear medium. In: 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Dnipropetrovsk, p. 26. IEEE Xplore, Dnipropetrovsk, Ukraine (2014).
9. Dumin, O.M., Tretyakov, O., **Akhmedov, R.**, Stadnik, Y., Katrich, V., Dumina, O.: Modal basis method for propagation of transient electromagnetic fields in nonlinear medium. In: Proc. 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), pp. 100-103. IEEE Xplore, Kharkiv, Ukraine (2014)
10. Dumin, O., Tretyakov, O., **Akhmedov, R.**, Dumina, O.: Transient electromagnetic field propagation through nonlinear medium in time domain. In: International Conference on Antenna Theory and Techniques, pp. 93-95. IEEE Xplore, Kharkiv, Ukraine (2015)
11. Dumin, O., **Akhmedov, R.**, Dumina, O.: Propagation of transient field radiated from plane disk in nonlinear medium. In: Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, pp. 77-80. IEEE Xplore, Odessa, Ukraine (2016)
12. Dumin, O., **Akhmedov, R.**, Dumina, O.: Transient field radiation of plane disk into nonlinear medium. In: Radio Electronics and Info Communications, pp. 1-4. IEEE Xplore, Kiev, Ukraine (2016)
13. Dumin, O., **Akhmedov, R.**, Katrich, V., Dumina, O.: Transient radiation of circle with uniform current distribution. In: 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 261-265. IEEE Xplore, Kiev, Ukraine (2017)
14. **Akhmedov, R.**, Dumin, O.: Ultrashort impulse radiation from plane disk with uniform current distribution. In: Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, pp. 169-173. IEEE Xplore, Odessa, Ukraine (2018)
15. Dumin, O., **Akhmedov, R.**, Dumina, O., Cherkasov, D.: Near zone of plane disk with uniform transient current distribution. In: 2017 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 209-213. IEEE Xplore, Lviv, Ukraine (2019)
16. Dumin, O., **Akhmedov, R.**, Katrich, V., Cherkasov, D.: Impulse electromagnetic wave propagation in Kerr medium. In: 2019 XXIVth

International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), pp. 169-173. IEEE Xplore, Lviv, Ukraine (2019).

17. **Akhmedov, R.:** Neural radio in DS-UWB IoT applications. In: 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), pp. 1073-1078. IEEE Xplore, Kharkiv, Ukraine (2020)

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

18. **Ахмедов, Р. Д.:** Спосіб виділення корисної інформації з надширококустових (НШС) електромагнітних хвиль. Український інститут інтелектуальної власності а02004038, 20 липня 2020

**АНОТАЦІЯ**

**Ахмедов Р. Д. Поля імпульсних антен у лінійному та нелінійному середовищах – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 Радіофізика. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичному дослідженню властивостей імпульсного електромагнітного пікосекундного та наносекундного випромінювання в ближній та проміжній зонах. Тематику всієї роботи можна окреслити єдиним підходом до розв'язання задач випромінювання та приймання електромагнітних імпульсів з урахуванням ефектів ближньої зони, який полягає у відмові від спектральних перетворень та роботі в часовій області, що дозволяє уникнути появи ближньої зони, як особливого випадку розв'язання. Задачі, яким присвячена робота, здебільшого розглянуто з апертурними антенами імпульсного випромінювання як джерело поля. Увага до ближньої зони обумовлена декількома факторами: ефектом концентрації енергії апертурними імпульсними антенами у ближній зоні, що спричиняє прояв слабконелінійних ефектів та викривлення фронту імпульсу в зоні формування електромагнітної хвилі.

В роботі уперше отримано перехідну функцію антени імпульсного випромінювання К. Баума в явному виді від просторових координат точки спостереження та часу. Окрім цього, враховано нелінійну взаємодію поодинокого наносекундного імпульсу з керрівським середовищем. Отриманий теоретичний доробок використано для удосконалення методики виділення корисної інформації з імпульсної надширококустової хвилі з урахуванням ефектів ближньої зони випромінювання.

**Ключові слова:** часова область, електромагнітний імпульс, надширококустова електродинаміка, керрівська нелінійність, слабка нелінійність, метод еволюційних рівнянь, машинне навчання, рекурентні нейронні мережі, тривала короткочасна пам'ять.

**ABSTRACT****Akhmedov. R. Field of Impulse Radiating Antennas in Linear and Nonlinear Medium – Manuscript.**

Dissertation for the degree of a candidate of physical and mathematical sciences in specialty 01.04.03 Radiophysics. V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The manuscript is a theoretical investigation of impulse ultrawideband electromagnetic field properties in near and far radiation zones. The whole thesis topic is united by the same approach of radiation and reception problems solving with an attention to near zone effects. The idea of the approach is to avoid furrier transform and provide a solution in time domain. As the result the solution will not carry near radiation zone as a spatial case of radiation. Most of problems considered in the manuscript have impulse radiating antenna as a source of electromagnetic filed. The attention to near radiation zone is caused by energy concentration with nonlinear interactions and impulse shape distortion.

The analytical solution for the nanosecond electromagnetic pulse radiation into nonlinear medium with near zone accounting was obtained for the first time. The circular aperture is considered as a source of a single nonstationary electromagnetic pulse with Heaviside like time dependency. The obtained analytical statement for e-filed intensity contains multiple integral over fast oscillation function with Bessel function core. The integral was numerically calculated with explicit accuracy by multidimensional quadrature rules of Simpson-Runge.

The obtained statement of nonlinear filed intensity contains integral coefficient, but the dependency from azimuthal angle and maximum magnitude are presented in closed form. The statement allowed to observe time domain analogs of known nonlinear effects. Also, graphical analysis of the statement performed. Moreover, the cubic nonlinearity was generalized to the case of weak polynomial nonlinearity. The nonlinear propagation modeling does not include the influence of medium dispersion.

The obtained liner solution in closed form was applied to information transmitting and reception modeling. The analysis and literature review faces out the near-far communication problem. The manuscript contains the patented methodic of information extraction with near zone accounting. The methodic is based on usage of topolectal separated on encoder and decoder physical neural network with long-short term memory as a structural unit.

**Keywords:** time domain, electromagnetic pulse, ultrawideband, Kerr nonlinearity, weak nonlinearity, evolutionary approach, machine learning, recurrent neural networks, long-short term memory.