

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

БЕРЕЗКІНА АНДРІЯ ЛЕОНІДОВИЧА

“Методи та програмні засоби підвищення ефективності прийому радіосигналів в тунелях шахт”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертаційна робота Березкіна А.Л. присвячена розробці методів, моделей та програмних засобів та має на меті забезпечення ефективного прийому радіосигналів на основі розробки методів визначення місць розташування радіоприймачів та зниження рівня помилок при прийомі в умовах тунелів шахт.

### **Актуальність теми.**

Тунелі шахт характеризуються складною геометрією поверхонь, що при розповсюдженні радіосигналів зумовлює наявність таких явищ, як дифракція та інтерференція. Ці явища призводять до появи інтермодуляційних завад, явища загасання радіосигналу та інших.

Створення системи радіозв'язку в тунелях шахт передбачає вирішення завдання радіопланування, що включає вибір кількості приймачів, вибір схеми розміщення передавачів та приймачів радіосигналу та врахування їх взаємних переміщень. При вирішенні практичних завдань актуальним є мінімізація кількості приймальних пристроїв, які забезпечують стійкий прийом радіосигналу.

При багатопроменовому розповсюдженні радіосигналів в тунелях шахт з ростом відстані між приймачем та передавачем вклад в енергію сигналу в точці прийому складової прямолінійного розповсюдження суттєво зменшується. При оцінці загальної енергії сигналу в точці прийому необхідно також враховувати всі її складові. За наявністю оцінки вкладу кожної із компонент в сумарну енергію прийнятого сигналу можна отримати наближену оцінку енергії радіосигналу в різних точках тунелю, що може бути використано при визначенні ефективної відстані до радіоприймачів.

На даний час на промислових підприємствах впроваджуються технології мобільного зв'язку, позиціонування персоналу і транспортних засобів з використанням обладнання різноманітних світових компаній. Гарантована робота таких радіопристроїв досягається використанням особливих протоколів радіообміну та програмних засобів, які є комерційною таємницею. Технічними характеристиками таких систем передбачається, що відстань між передавачем та приймачем може бути в межах до 300 метрів. Тому при вирішенні практичних завдань доцільною є

*УТМЕ Вх. 125*  
*05.04.2021р.*

розробка програмних засобів, які можуть бути використані в існуючих системах обладнання радіозв'язку при вимогах обмеження дальності передачі. Важливим є також створення передумов для розробки такого обладнання в Україні. Однак слід враховувати, що при багатопроменевому розповсюдженні радіосигналів та наявності інтерференційних завад для забезпечення надійного прийому «свого» сигналу слід відмежуватися від сторонніх сигналів. Тому виділення «свого» сигналу є ще одним із важливих завдань, що потребують вирішення на основі використання наявних можливостей програмної обробки радіосигналів існуючими технічними засобами, включаючи новітні Software Defined Radio (SDR)-технології.

Розробка методів, моделей та програмних засобів для вирішення завдань радіопланування, забезпечення ефективного прийому радіосигналів на основі ідентифікації «свого» радіосигналу та оцінки можливостей створення засобів багатоканального панорамного приймача на засадах SDR-технології є актуальними завданнями дослідження.

### **Структура та зміст роботи.**

Огляд робіт за тематикою дисертаційної роботи зроблено в **розділі 1**, а основні теоретичні положення роботи викладені в **розділах 2 – 4**.

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науково-прикладними програмами, планами і темами, сформульована мета роботи, основні напрями досліджень і методи їх вирішення. Надано опис об'єкту і предмету досліджень, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію результатів роботи і публікації.

**В розділі 1** дано характеристику тунелів шахт та наведені методи радіопланування в них. Розглянуто типовий вигляд горизонту шахти та приклади типових поверхонь тунелів шахт. Проаналізовано особливості розповсюдження радіосигналів в тунелях шахт, серед яких: наявність всередині великої кількості різноманітного обладнання, рухомого обладнання та транспортних засобів, різноманітних комунікацій, джерел електромагнітних завад. Має місце складна внутрішня конфігурація геометричних профілів поверхонь, що не завжди дозволяє встановити джерела електромагнітного випромінювання в потрібному місці.

Розглянуто ряд класичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль. Визначено, що в існуючих моделях не розглядались на достатньому рівні чинники формування і розповсюдження електромагнітних полів (ЕМП) та фізичні явища, що виникають у тунелях шахт, зокрема: формування ЕМП від вторинних джерел, що можуть здійснювати основний вплив на підсумкове електромагнітне поле; вплив зміни умов розповсюдження.

Описані умови експериментів, проведених у соляній шахті, та

наведено їх якісні результати. Показано, що зміна рівня радіосигналу, що мала місце в експериментах, не відповідає моделі розповсюдження радіосигналу у хвилеводі з урахуванням функції згасання для даних умов і геометричної форми тунелю, оскільки мав місце ефект підсилення рівня радіосигналу (явище аналогічне явищу «підсилення радіосигналу за перешкодою», що існує в умовах розповсюдження у вільному просторі).

Відмічено, що значним чинником для формування моделі розподілу енергії ЕМП у тунелях шахт є фактор затримки радіосигналу, якій необхідно враховувати для забезпечення надійності прийому.

В **розділі 2** вирішується завдання створення методу визначення ефективної відстані від джерела радіосигналу до приймача, які знаходяться в тунелі шахти. Пропонований метод заснований на використанні адитивної математичної моделі, яка описує складові електромагнітного поля в точці прийому.

В **підрозділі 2.1** на основі моделювання процесів розповсюдження радіосигналу у конкретному варіанті тунелю показано, що основна енергія випромінювання радіопередавача спрямована по висоті тунелю та значний її відсоток припадає на стінки тунелю, а пряма енергія радіовипромінювання майже відсутня. Тобто вздовж тунелю в основному розповсюджується електромагнітна енергія, яка віддзеркалюється від його стін та підлоги, тобто основним джерелом розповсюдження електромагнітних хвиль є вторинні джерела на поверхнях тунелю.

В **підрозділі 2.2** аналізується модель розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі. Показано, що застосування законів розповсюдження у вільному просторі для випадків тунелів шахт дуже обмежено, але можливо у випадку, коли замкнені простори є великими галереями. В більшості випадків антенну систему неможливо розмістити так, щоб радіопромінь розповсюджувався вздовж тунелю. Тому за основу формування електромагнітного поля в тунелях шахт потрібно брати вторинні джерела його утворення, а не поле, утворене випромінюванням антенного радіопристрою.

В **підрозділі 2.3** на основі принципу Гюйгенса зроблено висновки, що електромагнітне поле, сформоване за умови застосування монохроматичного сигналу, характеризується синфазністю та наявністю виражених максимумів і мінімумів. У випадку, коли електромагнітне поле формується переважно вторинними джерелами випромінювання умову синфазності виконати неможливо.

В **підрозділах 2.4 - 2.8** розглянуто особливості прямолінійного розповсюдження електромагнітних хвиль; явище посилення випромінювання за перешкодою; проходження електромагнітних хвиль через перешкоду з отвором, де випромінювання від первинного джерела може розглядатися як сукупність випромінювань від вторинних джерел та характеризується Френелівською зональною структурою розподілу енергії.

На основі проведеного аналізу, були встановлені причини виникнення зон «згасання» радіосигналу, які призводять до погіршення прийому радіоінформації. Доведено, що ефект «згасання» має місце через зонально - Френелівську структура радіоканалу, що пов'язано зі зміною фази в площині зон Френеля. Відмічено, що зони «загасання» на фазовій поверхні розташовані на відстані довжини хвилі радіосигналу.

В **підрозділі 2.9** показано, що властивості траси радіосигналу між радіопередовачем і радіоприймачем суттєво впливають на формування електромагнітного поля в тунелях шахт і значною мірою визначають якість прийому радіосигналу. При поширенні радіохвиль в тунелях шахт точки формування вторинного випромінювання (точки відображення) можна розглядати як окремі радіотраси у вигляді моделі послідовних випромінювачів (передавачів) і точок прийому-випромінювання (приймачів). Тому, ґрунтуючись на принципі Гюйгенса-Френеля, в даній, конкретній точці прийому не може бути яскраво вираженого мінімуму або максимуму для будь якого джерела радіосигналу, оскільки в цю точку можуть приходити вторинні випромінювання зі всієї поверхні тунелю.

В **підрозділі 2.10** описано вдосконалена адитивна математична модель для енергії електромагнітного поля в точці прийому, яке розповсюджується в тунелях шахт, та метод визначення ефективної відстані між передавачем та приймачем. При формування вдосконаленої адитивної моделі використані відомі класичні моделі формування електромагнітного поля: створеного первинним джерелом, віддзеркалювання від гладкої поверхні, створеного поверхнею, що обмежує об'єм, дифракції на площині, прямолінійного розповсюдження, проходження через перешкоду з отвором, розповсюдження у вільному просторі та розповсюдження у неоднорідному середовищі. В залежності від умов розповсюдження радіосигналу вплив кожної зі складових може бути різним. Оскільки складові моделі описують процеси розповсюдження сигналу в довільній точці, то на їх основі можна обчислити значення енергії сигналу в інших точках тунелю. Така екстраполяція дасть наближене значення енергії поля в наступній точці, яке може бути уточнено на основі результатів експериментальних вимірювань, у чому й полягає суть запропонованого методу.

В **розділі 3** для забезпечення селекції «свого» радіосигналу запропоновано метод ідентифікації на основі критерію «збігу фазового портрету» з урахуванням зміщення частоти радіосигналу.

В **підрозділі 3.1** проведений аналіз чинників, характерних для тунелів шахт, та дана оцінка їх впливу на якість прийому радіосигналу. На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш суттєвий вплив на якість радіосигналу в точці прийому оказує ширина смуги пропускання приймача.

Встановлено, що, маючи радіоприймальний пристрій з певними технічними параметрами, можливо забезпечить прийом інформації із заданими ймовірностями бітових помилок при достатньо великій девіації несучої частоти інформаційного сигналу.

За умови, що час затримки радіосигналу менший за критичне значення, похибку, що виникає як наслідок зсуву частоти радіосигналу і веде до погіршення відношення сигнал/завада, можливо виправити переміщенням смуги прийому радіоприймача і таким чином підвищити якість прийому інформації. Затримка радіопроменю компенсується на основі використання протокольних (програмних) та технологічних методів. Як зазначено в **підрозділі 3.2**, при прийомі радіосигналу в умовах багатопроменевого розповсюдження важливо виділити сигнал, який має мінімальні відхилення своїх параметрів від параметрів випроміненого сигналу за деяким критерієм. Аналіз таких критеріїв здійснюється в **підрозділах 3.3 – 3.7**.

Проведено аналіз інформаційних параметрів радіосигналу. В результаті обробки прийнятих сигналів при їх прийомі можна отримати інформацію про амплітуду, фазу, тип модуляції, тривалість сигналу, спектральні характеристики (параметри частотного і фазового спектру). Визначено, що тільки тип модуляції та спектральні характеристики мають найбільшу стійкість до змін при багатопроменовому розповсюдженні радіосигналів, що може бути використано при ідентифікації «свого» радіосигналу.

Обрано критерії виявлення корисного сигналу на тлі випадкових перешкод. Проаналізовані типи модуляції.

Виконано аналіз спектральних характеристик радіосигналів, розглянуті спектральні перетворення Фур'є, Лапласа, Хартлі, вейвлет-перетворення, перетворення Габору та запропоновано використовувати Фур'є-перетворення. При цьому на точність обробки суттєвий вплив має тип вікна фільтра.

Показано, що при багатопроменовому розповсюдженні радіосигналів фазові спектральні характеристики - фазовий спектр, відображений на фазовій площині (так зване «фазове сузір'я») найкраще підходять для ідентифікації «свого» радіосигналу.

В **підрозділі 3.8** проведено аналіз та визначена загальна сукупність складових, що дають внесок у формування, як корисних (інформаційних) змін в радіосигналі, так і тих, що вносять завадові фазові модуляції. В прийнятому ансамблі радіосигналів, із-за умов багатопроменевого розповсюдження в замкненому просторі, можлива ситуація, коли радіосигнал, що дійшов від радіопередавача до радіоприймача без віддзеркалювання. В цьому випадку задача ідентифікації зводиться до знаходження такого радіосигналу, фазове сузір'я якого більше всього подібне до фазового сузір'я джерела. В розділі 3.9 наведена типова блок-

схема сучасного радіопередавача та на її основі описаний процес обробки фазового спектру з метою ідентифікації радіопередавача.

В **підрозділах 3.10, 3.11, 3.13** вирішується задача розробки методу ідентифікації «свого» радіосигналу за критерієм близькості фазового сузір'я. Вказана задача зводиться до побудови кінцево-збіжних алгоритмів, в яких реалізується порівняння еталонного цифрового зображення «фазового сузір'я» з «фазовим сузір'ям» прийнятого радіосигналу по одному з каналів адаптивного панорамного радіоприймача. Це, на відміну від існуючих методів, дозволяє програмно визначати зміщення частоти, що забезпечує селекцію свого радіосигналу, за рахунок чого досягається стійкий прийом сигналу.

В **розділі 4** вирішується завдання оцінки можливостей побудови адаптивного панорамного радіоприймача, в якому реалізований запропонований алгоритм ідентифікації «свого» радіосигналу.

Проведено аналіз сучасних технічних рішень створення адаптивного панорамного радіоприймача та можливостей комп'ютерного моделювання процесів в ньому. В роботі при створенні моделей радіопристроїв вибрано варіант побудови радіоприймача за схемою багатоканального прийому, для цього використані дві програмні платформи моделювання – Matlab та GNU-radio. Запропоновано використовувати модель оцінки обчислювального навантаження: визначати загальний час, за який виконується аналіз переданого сигналу.

При проведенні комп'ютерних експериментів із застосуванням GNUradio-моделі та Simulink-моделі приймача для тестових послідовностей радіосигналів, для яких відношення сигнал/завада перевищує 5 dB встановлено, що при використанні методу визначення «свого» радіосигналу кількість бітових помилок при прийомі зменшується в декілька разів.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Наукові положення та висновки, що сформульовані в дисертації, обґрунтовані на достатньому рівні. Методи дослідження, що використовуються в роботі (математичне моделювання, теорія множин, теорія графів, обчислювальні методи), застосовано коректно. Достовірність теоретичних результатів перевірена шляхом проведення комп'ютерних експериментів.

**Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечена коректністю постановки математичних задач з урахуванням відповідних обмежень, використанням сучасних математичних методів, адекватністю пропонованих математичних моделей процесів в досліджуваних об'єктах

та апробацією основних результатів на представницьких наукових конференціях.

Отримані результати вважаю обґрунтованими, достовірними та новими.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному.

1. Вперше запропоновано метод визначення відстані до місця розміщення радіоприймачів при вирішенні завдань радіопланування в тунелях шахт на основі використання вдосконаленої адитивної математичної моделі енергії електромагнітного поля в точці прийому, що описує як процеси прямолінійного розповсюдження радіосигналів, так і ті, що виникають внаслідок віддзеркалення електромагнітних коливань від поверхонь тунелів шахт. Складові, що входять в математичну модель, визначаються за існуючими класичними моделями розповсюдження радіохвиль, а коефіцієнти налаштування вкладу кожної зі складових визначаються методом найменших квадратів за експериментальними даними. В запропонованому методі ітераційний процес уточнення відстані між передавачем і приймачем реалізується за рахунок екстраполяції функції енергії поля на іншу відстань з урахуванням обмеження на мінімальну енергію сигналу відповідно чутливості радіоприймача, з подальшим експериментальним підтвердженням рівня енергії сигналу.

2. Удосконалено метод ідентифікації радіосигналів на основі критерію «збігу фазового портрету» при направленому переборі значень зміщення частоти. На відміну від існуючих, запропонований метод дозволяє програмно визначати зміщення фазового спектру, що забезпечує селекцію свого радіосигналу, за рахунок чого досягається стійкий прийом сигналу, в тому числі і для випадку динамічних змін меж областей розповсюдження.

3. На основі оцінки обчислювального навантаження на процесор SDR-пристрою запропоновано обчислювач, який відповідає технічним вимогам щодо якості прийому радіосигналу в реальному часі. Розроблено його GNUradio-модель та Simulink-модель, що пов'язують часові параметри радіосигналу з параметрами процесора. При дослідженні моделей в комп'ютерних експериментах для тестових послідовностей радіосигналів, для яких відношення сигнал/завада перевищує 5 dB, встановлено, що при використанні методу визначення «свого» радіосигналу кількість бітових помилок при прийомі зменшується в декілька разів.

**Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Наукова цінність основних положень дисертації полягає у розробці:

– методу ітераційного визначення ефективної відстані між передавачем та приймачем радіосигналу на основі моделі оцінки енергії

сигналу в точці при екстраполяції її значення на інші точки тунелю з урахуванням обмеження на мінімальну енергію сигналу з подальшим експериментальним підтвердженням рівня енергії сигналу. Функції енергії в точці для складових, що входять в математичну модель, визначаються згідно існуючих класичних моделей розповсюдження радіохвиль. А загальна функція енергії поля в точці прийому формується як адитивна сума функцій складових поля, де коефіцієнти налаштування вкладу кожної з складових визначаються методом найменших квадратів за експериментальними даними;

– методу програмного визначення величини зміщення частоти при динамічній зміні умов розповсюдження радіосигналу на основі критерію «збігу фазового портрету».

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені методи та моделі дозволяють:

- спростити розрахунок пунктів розміщення радіоприладів;
- підвищити якість прийому радіосигналу за рахунок зниження числа бітових помилок;
- спростити вибір мікропроцесора при проектуванні адаптивного панорамного радіоприймача для роботи в умовах тунелів шахт при створенні приймача, в якому реалізується запропонований метод ідентифікації радіосигналів і забезпечується їх ефективний прийом.

### **Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.**

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження опубліковані в 17 наукових працях, з яких: 6 статей у наукових фахових видання, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на патент і 9 матеріалів і тез доповідей на наукових конференціях, 1 стаття в журналі, який індексований в міжнародній наукометричній базі SCOPUS, 3 доповіді на науково-практичних конференціях індексованих в міжнародних наукометричних базах SCOPUS.

В опублікованих працях в фахових наукових виданнях повністю викладено основні наукові положення дисертаційної роботи та отримані результати, а рівень та кількість публікацій відповідають вимогам до кандидатських дисертацій в Україні.

**Автореферат** ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає актуальність, мету та задачі, основні наукові положення, практичну значущість, апробацію дисертації, її зміст по розділах, та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

При загальній позитивній характеристиці роботи є ряд зауважень.

### Зауваження до роботи.

1. В роботі при вирішенні завдань визначення ефективної відстані між передавачем і приймачем та забезпечення ефективного прийому радіосигналу використовується поняття «реальний час». При прийманні сигналу «реальний час» визначається швидкістю передачі інформації. Проте в дисертації не вказано і не зрозуміло що розуміється під цим поняттям при визначенні ефективної відстані. На стор. 123 використано також термін «нереальний час», що є некоректним.

2. Стосовно методу визначення ефективної відстані між передавачем та приймачем в дисертації не вказано інформацію про отримані практичні результати.

3. При побудові вдосконаленої адитивної математичної моделі енергії сигналу в точці прийому використовуються дані експериментальних вимірювань. В дисертації не представлено інформацію про те, яким чином отримані експериментальні значення для випадку багатопроменевого розповсюдження. Явище рефракції також не розглядається.

4. При описі параметрів сигналу на вході приймального пристрою (стор. 84 дисертації та 10 автореферату) виділено робочу (несучу) частоту  $f_0$ . Проте таке значення частоти можна виділяти тільки для передавача.

5. В роботі використовується поняття «свій радіосигнал». Чітке його означення відсутнє. Його трактування дано на сторінці 82: «...При прийомі радіосигналу в умовах БППР важливо виділити сигнал, який має мінімальні відхилення своїх параметрів від джерела...». Хоча по суті це сигнал, фазовий портрет якого близький до фазового портрету джерела випромінювання.

6. В роботі на стор. 70 вказується: «...у випадку шахти вздовж тунелю ЕМП буде мати максимуми і мінімуми, рисунок 2.16». Такий факт має місце тільки для одночастотного процесу, що доцільно було вказати, оскільки зрозуміти це з матеріалу розділу складно.

7. В авторефераті та в дисертації не представлена інформація про те, яким чином отримано зменшення бітової помилки в 10 разів.

8. В роботі в підрозділі 3.10 наведений адаптивний алгоритм, але немає оцінки його швидкодії та умов збіжності.

9. Є ряд зауважень до оформлення дисертації та автореферату:

- в дисертаційній роботі не розшифровано скорочення ЕМЕ, РН, а в авторефераті – скорочення SDR, DSP, GNUрадіо, МШП, ШПФ;
- в нумерації розділів в дисертаційній роботі пропущено розділ 3.12, але повторюється підрозділ 2.2;
- не позначені осі на рисунку 2.8, рисунку 2.16;
- на стор. 77 в розділі 3 таблиця позначена 2.1;
- на стор. 83 радіозавада позначена  $n(t)$ , а на стор. 103 –  $\gamma(t)$ ;

- в одному розділі дисертаційної роботи частота дискретизації позначена  $f_s$ , в іншому –  $F_d$  (стор. 119);

- наявна велика кількість граматичних та стилістичних помилок, зокрема на сторінках: 42, 47, 48, 51, 55–71, 76, 79, 87–90, 97, 99–102, 105, 109, 119, 120, 122, 125, 130, 140.

Зроблені зауваження впливають на характеристику роботи, проте не впливають на загальну її позитивну оцінку.

#### **Загальні висновки.**

Вважаю, що дисертаційна робота БЕРЕЗКІНА Андрія Леонідовича “Методи та програмні засоби підвищення ефективності прийому радіосигналів в тунелях шахт” за актуальністю, обсягом проведених та використаних досліджень, науковою новизною, практичною цінністю є завершеним науковим дослідженням, відповідає спеціальності 01.05.02 – “Математичне моделювання та обчислювальні методи”, задовольняє вимогам до кандидатських дисертацій згідно п.п. 9, 11 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами та доповненнями), а її автор, Березкін Андрій Леонідович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за обраною спеціальністю.

Опонент доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електрообладнання і автоматики суден  
Національного університету

«Одеська морська академія»

І.М.Гвоздева

