

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

РУБАН ВАДИМ ПЕТРОВИЧ

УДК 53.082.74: 621.317.3

АДАПТОВАНЕ СТРОБОСКОПІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ
ВІДЕОІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ У РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
НАН України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Почанін Геннадій Петрович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу радіофізичної інтроскопії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна,
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Залевський Геннадій Станіславович,
Харківський національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
професор кафедри озброєння радіотехнічних військ.

Захист відбудеться « 12 » березня 20 21 р. о 14:00 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 « 10 » лютого 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ **Юрій АРКУША**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних задач, що вимагають свого розв'язання на сучасному етапі розвитку методів і засобів надширокосмугового (НШС) відеоімпульсного радіолокаційного підповерхневого зондування, є підвищення якості первинної радіолокаційної інформації, адже саме не викривлені дані надають змогу визначати структуру середовища, що зондується, з високою точністю. Якість первинних даних є особливо актуальною тоді, коли необхідно ідентифікувати об'єкти в середовищі, електрофізичні параметри якого майже не відрізняються від параметрів самого об'єкта (слабоконтрастні об'єкти). Вона дуже важлива при глибинному зондуванні середовища, або при дослідженні середовищ, що характеризуються великими поглинанням і дисперсією. В цих випадках потрібно забезпечити якомога точнішу реєстрацію ледь помітних відбиттів, у тому числі за умов інтенсивного шуму.

Удосконалення елементної бази георадарів і методів обробки результатів зондування відбувається, власне кажучи, саме з цією метою. Тому особливої уваги дослідників потребує саме та частина НШС імпульсного георадара, яка відповідає за прийом і реєстрацію радіолокаційних сигналів.

Серед характеристик приймачів для НШС імпульсних георадарів, які в першу чергу потребують покращення, слід виділити такі:

- динамічний діапазон приймальної частини локатора – відношення максимальної амплітуди сигналу на вході приймача до рівня шумів, приведених до входу приймача;
- порогова чутливість приймача.

Обидві характеристики значною мірою залежать від того, наскільки можуть бути зменшені шуми на вході приймача. Тому, безумовно, актуальною є задача зниження рівня шуму на вході і, як результат, підвищення чутливості прийомних систем радарів.

Слід зазначити, що сформульовані вище задачі завжди існували, існують і будуть існувати, оскільки немає такої межі, досягнення якої буде абсолютно достатнім. Однак цілком реально досягти таких параметрів, які забезпечують впевнене виконання конкретних практично важливих завдань.

Більшість сучасних завдань у підповерхневій радіолокації потребують сигналів зондування у вигляді НШС імпульсних електромагнітних полів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалостей. Розв'язати задачу точної реєстрації таких коротких імпульсів дозволяє стробоскопічне перетворення. Воно надає змогу трансформувати масштаб часу (трансформувати часову шкалу при реєстрації імпульсів від нано- та субнаносекундних тривалостей до мілі- або мікросекундної тривалості) без спотворення часової залежності в трансформованому («еквівалентному») часі.

Перетворені імпульси можуть бути оцифровані існуючими нині багаторозрядними аналого-цифровими перетворювачами (АЦП). Наприклад, 18-ти розрядний АЦП дозволяє розрізняти амплітуди, які відрізняються на $1\text{В}/2^{18} \approx 4 \text{ мкВ}$. При цьому рівень шуму приймачів, що працюють в смузі частот до декількох гігагерц, зазвичай, знаходиться в межах від десятих до одиниць мілівольта (або десятки - сотні кроків дискретизації за амплітудою). Отже, вже зараз

потенційно існує можливість в сотні разів підвищити точність реєстрації форми імпульсів, але шумові характеристики вхідних кіл стробоскопічних перетворювачів (обмеженість динамічного діапазону приймача) перешкоджають цьому.

Тому розробка методів, що сприяють підвищенню якості первинної радіолокаційної інформації (іншими словами – точності реєстрації амплітудно-часової залежності електромагнітних імпульсів, розсіяних середовищем, що містить електрофізичні неоднорідності), шляхом розширення динамічного діапазону приймача відеоімпульсної радіолокаційної системи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у відділі радіофізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України відповідно до планів 4-х науково-дослідних робіт відомчої тематики в період з 2004 року до 2019 року (номери держреєстрації 0103U002265, 0107U001083, 0111U010474, 0117U004035); 3-х госпдоговірних НДР за номерами держреєстрації 0110U002386, 0111U005999 та «Ground penetrating radar to control soil structure under the surface (GPR «ODYAG»). Development and Delivery» Contract of International Research Cooperation № EX.IRE. 03/2016; 3-х НДР програмно-конкурсної тематики НАН України (номери держреєстрації 0112U004264, 0113U003385 та 0117U003178), а також в рамках проєктів міжнародного співробітництва: «Активні і пасивні мікрохвилі для безпеки і підповерхневого зондування» Сьомої рамкової європейської програми (номер проєкту PIRSES-GA-2010-269157, 2010–2013) та «Голографічний та імпульсний радари підповерхневого зондування для виявлення наземних мін і саморобних вибухових пристроїв» програми НАТО «Наука заради миру та безпеки» (номер проєкту G 5014, 2015–2018).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявлення фізичних закономірностей процесу стробоскопічного перетворення електричних імпульсів нано- та субнаносекундного діапазонів тривалості й використання цих закономірностей для зниження загального рівня шумів, приведених до входу приймальної системи, і розширення динамічного діапазону НШС імпульсних радіолокаційних систем.

Задачі дослідження:

- проаналізувати природу шумів, що з'являються в перетворювачах стробоскопічного типу, і методи зниження рівня приведених до входу шумів;
- розробити математичні моделі, функціональні та принципові схеми й експериментальні макети стробоскопічних перетворювачів;
- розробити генератор стробімпульсів, який формує короткі стробімпульси з тривалістю, що налаштовується цифровим способом;
- проаналізувати можливі варіанти побудови системи синхронізації стробування і визначити такі, що мінімізують відхилення моменту формування стробімпульсу в часі від заданого;
- теоретично та експериментально дослідити вплив параметрів стробоскопічного перетворення (аналогового накопичення енергії прийнятих імпульсів, тривалості вибірок, точності синхронізації стробування і інших) на характеристики перетворювача і точність відтворення форми імпульсу в

еквівалентному часі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є стробоскопічне перетворення електричних імпульсів нано- та субнаносекундної тривалості.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів стробоскопічного перетворення та шумових характеристик і точності відтворення амплітудно-часових параметрів перетворених імпульсів в еквівалентному часі.

Методи дослідження. В роботі використані як математичне моделювання і розрахунки процесів перетворення імпульсних сигналів, так і експериментальні методи верифікації теоретично отриманих закономірностей. Для теоретичного опису процесу перетворення обрано математичну модель стробоскопічного перетворювача, яка описує процес накопичення заряду в ємності змішувача при відкриванні/закриванні електронного (діодного) ключа. Розрахунки й аналіз процесу і результатів перетворення зроблено з використанням математичних моделей, які базуються на звичайному диференціальному рівнянні першого порядку та згортці. В експериментальних дослідженнях застосовано експериментальні зразки НШС імпульсних георадарів серії «ОДЯГ», для яких особисто автором створено стробоскопічні перетворювачі з цифровим управлінням тривалістю вибірки і аналоговим накопиченням. Коректність результатів вимірювань на всіх етапах контролювалася за допомогою стандартної вимірювальної апаратури: стробоскопічних осцилографів С1-70 зі змінними блоками: стробоскопічної розгортки Я40-2700 та підсилювача Я40-1700, а також стробоскопічного осцилографа Tektronix DSA8200. Для визначення ступеня впливу тривалості вибірки на шумові характеристики та відповідність форм імпульсів у реальному та еквівалентному часі застосовано методи статистичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів

- Вперше запропоновано метод стробоскопічного перетворення зі змінюваною тривалістю вибірки, що дозволило розширити динамічний діапазон стробоскопічного приймача на 22,3 дБ;
- отримав подальший розвиток метод аналогового накопичення для приймачів стробоскопічного типу. Показано, що у разі застосування стробоскопічного перетворювача з неповним зарядом накопичувальної ємності, аналогове накопичення призводить до зменшення часу наростання перехідної характеристики (ПХ) перетворювача і, як наслідок, до розширення робочої смуги частот приймача на 80% при 10-ти кратному накопиченні;
- удосконалено метод визначення нестабільності синхронізації (джитера) за амплітудними помилками, який ґрунтується на аналізі помилок перетвореного сигналу. В запропонованому методі дійсну амплітуду сигналу розраховують за двома сусідніми вибірками, беручи до уваги коефіцієнти передачі та втрат змішувача стробоскопічного перетворювача. Удосконалення дозволяє коректно оцінювати джитер синхронізації приймачів зі стробоскопічними перетворювачами, що працюють в режимі з неповним зарядом накопичувальної ємності;
- запропоновано та апробовано в георадіолокаційній системі метод адаптації параметрів стробоскопічного перетворення. Використання цього методу забезпечило підвищення ймовірності виявлення підповерхневих об'єктів з близькими до середовища електрофізичними параметрами, а також дозволило за результатами зондування відновити просторовий розподіл діелектричної

проникності та провідності середовища і визначити товщину шарів дорожнього одягу з точністю не гірше, ніж 5 мм.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи адаптованого стробоскопічного перетворення розширюють динамічний діапазон стробоскопічних приймачів і, тим самим, сприяють підвищенню точності результатів НШС імпульсних радіолокаційних вимірювань. Результати досліджень вже використовуються в:

- НШС імпульсних георадарах серії «ОДЯГ», розроблених для Харківського національного автомобільно-дорожнього університету з метою використання в дочірньому підприємстві Укравтодору «Дор'якість» (2011–2012 рр.), а також для Yildiz Technical University (Стамбул, Туреччина) (2016 р.) з метою визначення товщини шарів дорожнього одягу з точністю не гірше ніж 5 мм;
- в проєкті «Активні і пасивні мікрохвилі для безпеки і підповерхневого зондування» Сьомої рамкової європейської програми (PEOPLE-2010-IRSES FP7 – номер проєкту PIRSES-GA-2010-269157) 2011–2014 рр. для тестування методів мікрохвильової томографії відновлення підповерхневої структури ґрунту;
- в проєкті № G5014 «Голографічний та імпульсний радар підповерхневого зондування для виявлення мін і саморобних вибухових пристроїв», що виконувався за програмою НАТО «Наука заради миру та безпеки» 2015–2018 рр.;
- в елементах НШС імпульсних вимірювальних систем, створених в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках НДР «Електродинаміка відновлення інформаційних параметрів природних середовищ з використанням атомарних функцій і вейвлетів», що виконувалась в рамках Спільного конкурсу НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень у 2012–2013 роках, та НДР «Радіолокаційний моніторинг технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд», що виконувалась за Цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») у 2014–2015 роках;
- елементах радіолокаційної системи для спостереження за переміщенням об'єктів за стінами, що була створена в рамках НТР відповідно до цільової науково-технічної програми наукових досліджень НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави», 2017–2018 рр.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 6 статтях: 2 – у фахових виданнях України, 3 – у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science, 1 – в зарубіжному спеціалізованому виданні; в главі колективної монографії – у зарубіжному виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus; 1 патенті України; 9 працях апробаційного характеру (з яких 7 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

Особистий внесок здобувача. У роботах [1, 6, 7, 12, 13, 16] автору належить розробка експериментальних зразків стробоскопічних приймачів відеоімпульсних радіолокаторів, крім того, виконано обробку і аналіз результатів зондування. В роботах [2, 7] здобувачем розроблено експериментальний макет стробоскопічного приймача для НШС вимірювального комплексу; в роботах [3, 5, 8] – персонально розроблено

теоретичні моделі й обчислювальні алгоритми для комп'ютерного моделювання стробоскопічних перетворювачів; у роботах [3, 10, 11, 15] – самостійно проведено експерименти з перетворення НШС електричних імпульсів з метою дослідження ефектів, пов'язаних із впливом на результат перетворення варіацій тривалості вибірки і аналогового накопичення, а також сформульовано висновки цього дослідження; в роботі [17] – самостійно виконано патентний пошук і запропоновано формулу винаходу; в роботі [9] – самостійно розроблено генератор стробімпульсів, в якому передбачено можливість регулювання їх тривалості, а також досліджено закономірності цього регулювання; в роботі [14] – самостійно проведено експерименти з перетворення сигналів, проаналізовано характеристики перетворювача зі змінною тривалістю вибірки; в роботах [5, 8] – самостійно проаналізовано і сформульовано критерії для знаходження оптимальних параметрів стробоскопічного перетворення сигналів при наявності шуму.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації були представлені на міжнародних наукових конференціях: 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010), September 6–10, 2010, Sevastopol, Ukraine; 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2012), September 17–21, 2012, Sevastopol, Ukraine; XII Kharkiv Young Scientist Conference «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics». December 4–7, 2012, Kharkiv, Ukraine; 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST–2013), June 12–14, 2013, Istanbul, Turkey; 15th International radar symposium (IRS–2014), June 16–18, 2014, Gdansk, Poland; 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2014), September 15–19, 2014, Kharkiv, Ukraine; 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2015), July 7–10, 2015, Florence, Italy; 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2016), September 5–11, 2016, Odessa, Ukraine; XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'17), May 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінки, з яких 141 сторінка основного тексту. Список використаних джерел містить 111 найменувань. Дисертація ілюстрована 70 рисунками, 2 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність виконання досліджень та актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та визначено основні завдання для її досягнення. Представлено інформацію про об'єкт, предмет та 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 «Огляд наукової літератури і вибір напрямку досліджень» є оглядовим. В ньому розглянуто будову відеоімпульсних радіолокаційних систем з приймальними блоками стробоскопічного типу, описано принципи стробоскопічного перетворення сигналів, наведено класифікацію типів стробоскопічних перетворювачів. Проаналізовано режими роботи перетворювачів. Для подальшого дослідження виділено режим неповного заряду ємності, як

найбільш загальний і такий, що має можливості для удосконалення. Розглянуто характеристики перетворювачів: коефіцієнт передачі, перехідна характеристика, робоча смуга частот, чутливість, динамічний діапазон. Проаналізовано складові шумів стробоскопічного перетворювача та методи зниження їхнього рівня (аналогове накопичення), в тому числі розглянуто специфічні шуми, що виникають внаслідок нестабільності синхронізації перетворювача – джитер синхронізації, та описано метод його визначення для відеоімпульсних радіолокаційних систем. Сформульовано напрямки подальшого дослідження.

У другому розділі «Вплив процесів, які відбуваються під час накопичення заряду, на результат стробоскопічного перетворення» досліджено те, яким чином результат стробоскопічного перетворення залежить від параметрів перетворення та розглянуто шляхи покращення енергетичних характеристик перетворювача та зменшення спотворення форми сигналу при перетворенні. Результати розрахунків зіставлено з результатами натурних вимірювань.

Тривалість вибірки. Цей параметр визначає те, як накопичується заряд накопичувальної ємності перетворювача. Збільшення тривалості зменшує рівень шуму, але змінює форму перетвореного сигналу. В першому наближенні стробоскопічне перетворення з урахуванням тривалості вибірки можна моделювати як математичне усереднення прийнятого сигналу.

Досліджено вплив тривалості вибірки на результат перетворення за умов різних параметрів усереднення (кількість усереднень і тип усереднення — звичайне усереднення та усереднення у змінному вікні), визначено гранично припустимі тривалості вибірок для перетворення сигналів, характерних для НШС імпульсної радіолокації. Для цього перетворювач в наступному наближенні представлено у вигляді суматора (накопичувача). На рис. 1 показано перетворені сигнали прямокутної форми, отримані за допомогою даної моделі при зміні тривалості вибірки від малої до співмірної з тривалістю імпульсу, що реєструється.

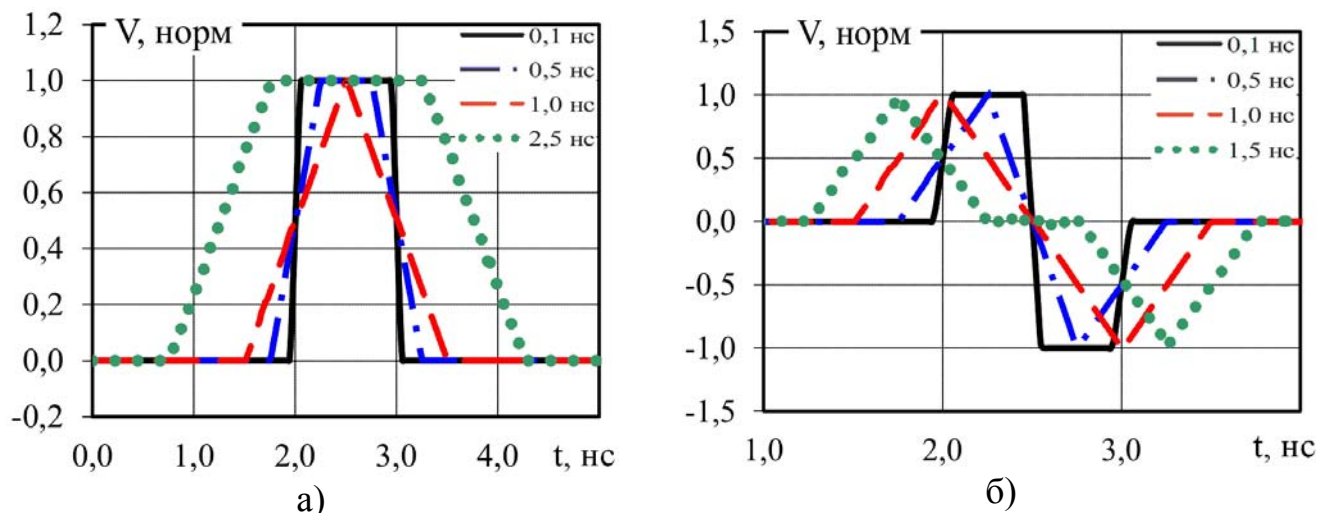


Рис. 1 Перетворення сигналів «прямокутної» форми а) – однополярного, б) – біполярного імпульсу за умови різних тривалостей вибірки. Імпульси нормовані на максимум амплітуди перетвореного сигналу

У наступному наближенні, з використанням моделі стробоскопічного перетворювача у вигляді ключа з накопичувальною ємністю, комплексно

досліджено вплив аналогового накопичення, нестабільності синхронізації, тривалості вибірки на ПХ, коефіцієнт передачі перетворювача, оцінено вплив втрат заряду на накопичувальній ємності на основні характеристики перетворювача. Ця модель математично описується лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{dv_n^i}{dt} + \frac{v_n^i}{\tau} = \frac{U(t)}{\tau}, \\ v_{0n}^i = v_n^{i-1} \left(T_n + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \exp\left(-\frac{T_R}{R_B C_H} \right), \\ t_{0n} = T_n - \frac{\delta}{2}, \quad t_{1n} = T_n + \frac{\delta}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

де $U(t)$ – сигнал, що подається до входу перетворювача; $\tau = R_L \times C_H$ – стала часу заряду накопичувальної ємності; R_L – еквівалентний опір стробоскопічного змішувача; C_H – ємність накопичувальної ємності; R_B – опір буферного підсилювача, в якому також може враховуватися струм витоку через діод змішувача в стані, коли діод закритий; множник $\exp(-T_R/(R_B C_H))$ описує розряд накопичувальної ємності під час фази зберігання заряду, яка триває час T_R – період повторення імпульсів; δ – тривалість вибірки; v_n^i – миттєва напруга на накопичувальній ємності; T_n – n -ий момент часу з часового вікна T в якому реєструється сигнал; v_{0n}^i – початкова напруга на накопичувальній ємності; t_{0n} , t_{1n} – межі інтервалу на якому шукається розв'язок; t – час. Індекс $1 \leq i \leq I$ позначає змінну кількості накопичень для аналогового накопичення.

Накопичення за відсутності шумів. Результати розрахунків (рис. 2) демонструють, що збільшення кількості накопичень I за умов, коли тривалість вибірки менша за сталу часу заряду накопичувальної ємності ($\delta < 0,2$ нс) зменшує час наростання ПХ τ_s , і, відповідно, розширює робочу смугу частот (рис.3).

Графіки на рис. 3 демонструють, при яких значеннях δ аналогове накопичення I найбільше впливає на відносне розширення робочої смуги частот

$$\Delta(I) = \frac{\Delta F(I) - \Delta F(I=1)}{\Delta F(I=1)} \cdot 100\%$$

Так, при тривалості вибірки, яка на порядок менша ніж стала часу заряду накопичувальної ємності, і при 10-ти накопиченнях робоча смуга частот розширюється з 2 ГГц до 3,5 ГГц (на 1,5 ГГц), що становить 75% від значення робочої смуги частот в режимі роботи змішувача без накопичення. У той самий час, при тривалості вибірки, яка досягає половини значення сталої часу заряду накопичувальної ємності, вплив аналогового накопичення на смугу робочих частот практично відсутній.

Струми витоку. Вплив тривалості вибірки та струмів витоку накопиченого заряду на коефіцієнт передачі досліджено за допомогою моделювання задачі перетворення імпульсу, який має часову залежність у вигляді σ -функції.

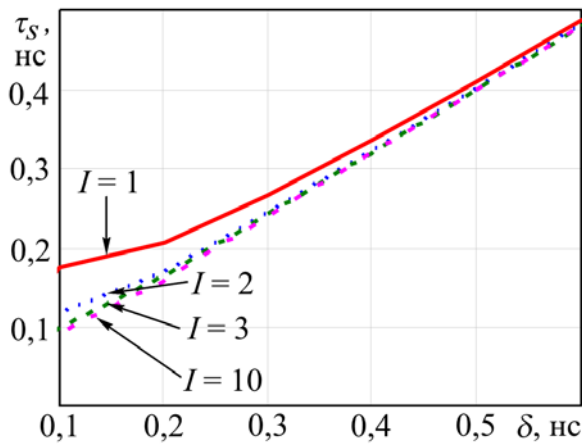


Рис. 2 Залежності часу наростання ПХ – τ_s від тривалості вибірки – δ для $I = \{1; 2; 3; 10\}$

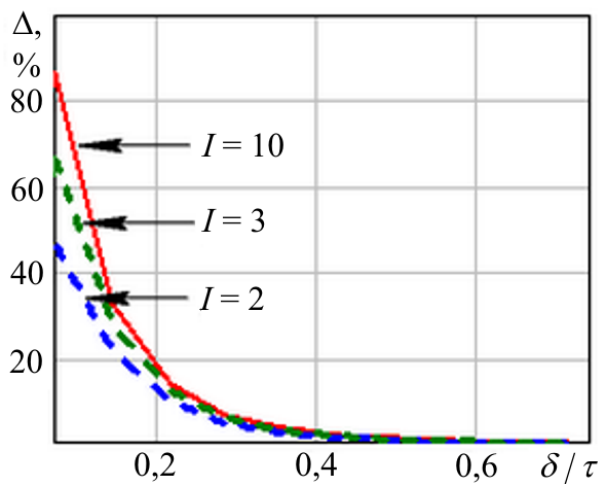


Рис. 3 Вплив аналогового накопичення на ширину робочої смуги частот при $I = \{2; 3; 10\}$

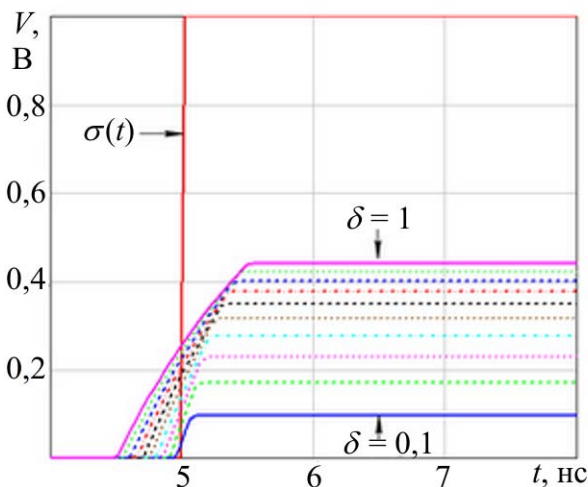


Рис. 4 Результат перетворення перепаду напруги при $\delta \in [0,1; 1]$ нс. Без накопичення $I = 1$

Очікувалось, що приріст заряду на ємності C_H має відбуватися доти, доки потенціали ємності і джерела сигналу не зрівнюються. Однак, як показує рис. 4, цього не спостерігається.

Причиною тому є струм витоку, обумовлений R_B . Разом з опором R_L вони задають баланс між зарядом, що надходить до C_H , і зарядом, що йде з неї протягом одного періоду повторень. Тому кожній тривалості вибірки відповідає своє значення амплітуди перетвореного імпульсу, що і демонструють епюри рис. 4 горизонтальними ділянками на часовому проміжку від 5,5 нс і далі для різних значень тривалостей вибірки.

Експерименти з визначення властивостей стробоскопічного перетворення сигналів з *аналоговим накопиченням*, в якому передбачена можливість регулювання тривалості стробімпульсу (наприклад, в межах від 0,1 до 0,4 нс), підтвердили коректність розрахунків. На рис. 5 показано залежності часу наростання ПХ та робочої смуги частот від тривалості вибірки при різних кількостях накопичень.

Як і при моделюванні, в експерименті спостерігалось розширення робочої смуги частот перетворювача внаслідок застосування аналогового накопичення при тривалостях стробімпульсу, набагато менших значення сталої часу заряду накопичувальної ємності змішувача. Відповідно для тривалості вибірок від 0,1 нс до 0,4 нс обрана теоретична модель стробоскопічного перетворювача дозволяє отримати достовірні дані щодо характеристик стробоскопічного перетворювача.

Експериментально отримана

залежність коефіцієнта передачі від тривалості вибірки має таку ж тенденцію до зростання, як і розрахована в теоретичній моделі, що показано на рис. 6.

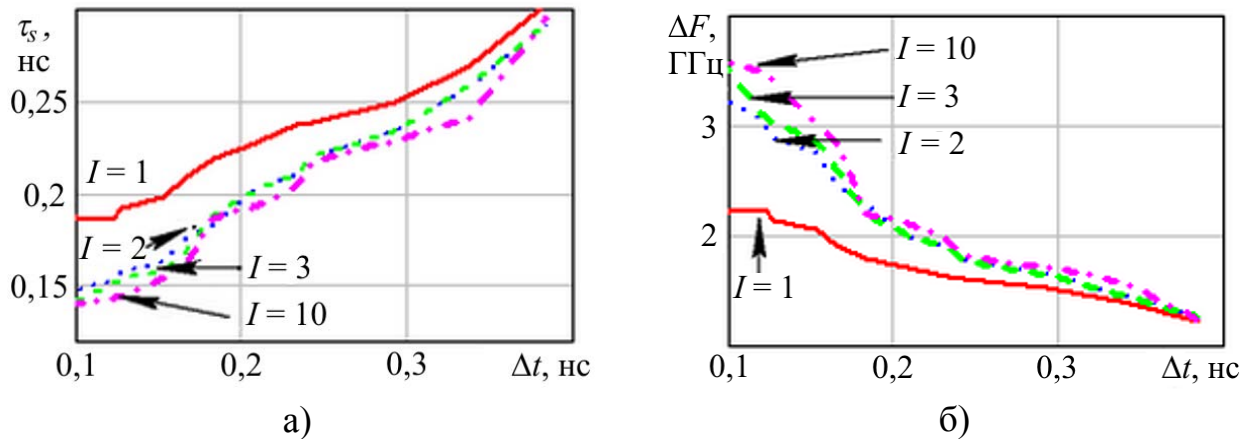


Рис. 5 Залежності часу наростання ПХ а) і робочої смуги частот б) від тривалості стробімпульсу і кількості накопичень I

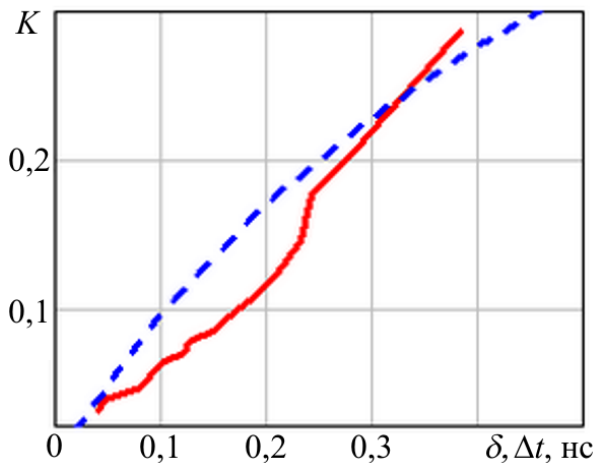


Рис. 6 Коефіцієнт передачі, розрахована залежність $K(\delta)$ – (штрихова лінія) і експериментальна залежність $K(\Delta t)$ – (суцільна лінія)

змінюваній ділянці фронту або спаду імпульсу, часова координата якої t_0 .)

$$\begin{aligned} t_j &= V_{er} / V'(t_0), \\ V_{er} &= V_i(t_0) - \overline{V(t_0)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де V_{er} – амплітудна помилка; $V'(t_0)$ – похідна сигналу; $V_i(t_0)$ – амплітуда сигналу; $\overline{V(t_0)}$ – усереднена амплітуда в показовій точці.

Для розрахунків обрано сигнал з лінійно наростаючим фронтом тривалістю Θ . Розглянуто режими стробоскопічного перетворення з повним і неповним зарядом накопичувальної ємності перетворювача. Для перетворювача з повним зарядом накопичувальної ємності визначено межі часового інтервалу на фронті сигналу, з

Джитер. Для дослідження впливу джитера на результат стробоскопічного перетворення використано рівняння (1) з модернізованими граничними умовами:

$$\begin{aligned} t_{0n} &= T_n - \frac{\delta}{2} + t_{er}^n, \\ t_{1n} &= T_n + \frac{\delta}{2} + t_{er}^n. \end{aligned} \quad (2)$$

де t_{er}^n – випадкове відхилення часу синхронізації вибірки.

Оцінка джитера t_j відбувалась за амплітудними помилками в показовій точці (точці, яка розташована на найшвидше

якого вибирається показова точка – ширини так званої показової області в залежності від рівня джитера (σ_r).

З'ясовано, що пряме застосування методу оцінки джитера за амплітудними помилками у випадку перетворення з неповним зарядом накопичувальної ємності принципово дає некоректні результати. На рис. 7 видно, що $\sigma_j \neq \sigma_r$. Вони відрізняються майже вдвічі на всьому інтервалі σ_r від 0,01 до 0,2.

За результатом дослідження показано, що цей метод можна застосовувати після відновлення амплітуди сигналу, обчислюючи реальну амплітуду за двома сусідніми вибірками з урахуванням коефіцієнта передачі і коефіцієнта втрат змішувача стробоскопічного перетворювача. Перерахунок амплітуди проводився за формулою:

$$U_n = \frac{V_n + (k-1)\mathcal{G}V_{n-1}}{k}, \quad (4)$$

де V_n – напруга на накопичувальній ємності після n -го стробування; V_{n-1} – напруга на накопичувальній ємності після $(n-1)$ -го стробування; $\mathcal{G}$ – коефіцієнт втрат перетворювача (в даному випадку замінимо його множником, який описує струм витоку в (1): $\mathcal{G} = \exp(-T_R(R_B C_H))$); k – коефіцієнт передачі перетворювача; U_n – напруга на виході джерела сигналу в момент n -го стробування.

Уточнений в такий спосіб метод оцінки джитера дає коректні значення джитера і у випадку перетворення з неповним зарядом накопичувальної ємності. Рис. 8 демонструє відповідність рівня джитера σ_j , оціненого з запропонованим у роботі уточненням (4), та заданого в моделі σ_r . На відрізку від 0,01 до 0,15 $\sigma_r \approx \sigma_j$.

Також слід відзначити, що помилка оцінювання джитера збільшується при збільшенні тривалості вибірки.

Експерименти. Щоб оцінити вплив тривалості вибірки та накопичення на форму перетвореного сигналу, проведено серію експериментів з перетворення імпульсів стробоскопічним перетворювачем з неповним зарядом накопичувальної ємності і при збільшеній тривалості вибірки.

Ці експерименти показали, що при перетворенні імпульсів гаусової форми і форми похідної від гаусіана, за умови збільшеної тривалості вибірки, зростає амплітуда та тривалість перетвореного імпульсу.

Разом з цим, аналогове накопичення призводить до збільшення пікової амплітуди та зменшення тривалості перетвореного імпульсу (рис. 9 а, б).

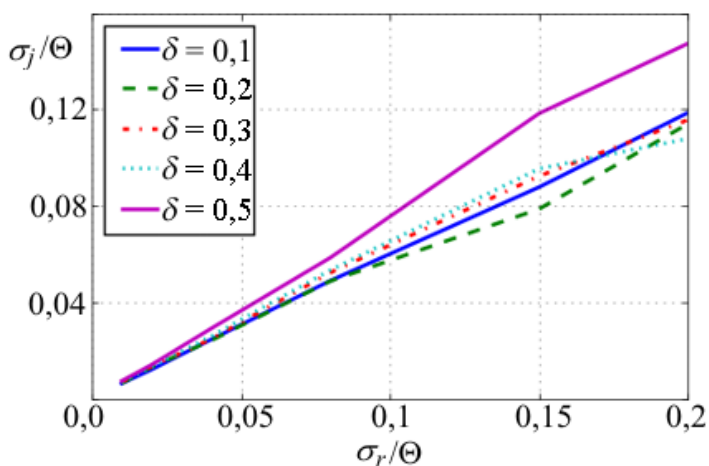


Рис. 7 Залежність розрахованого рівня джитера σ_j від наперед заданого в моделі σ_r для стробоскопічного перетворення з неповним зарядом накопичувальної ємності за умов $\delta = 0,1 \div 0,5 \Theta$

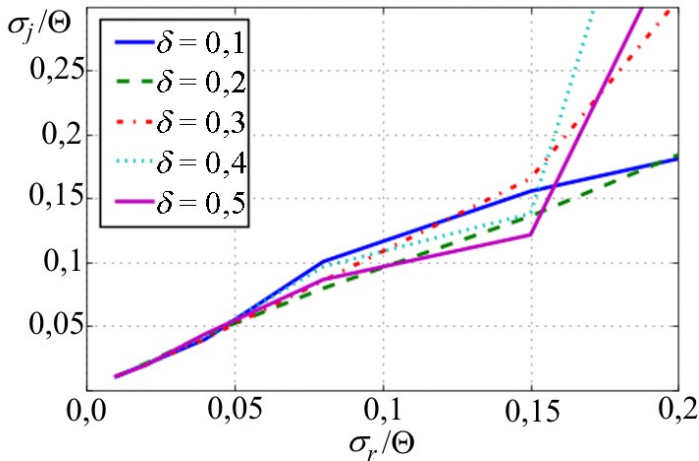
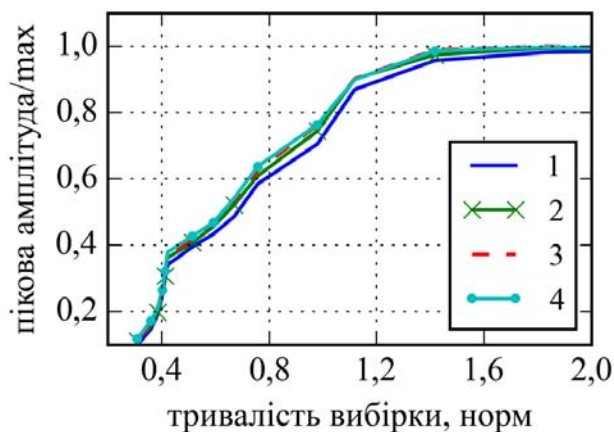


Рис. 8 Перерахований рівень джитера при тривалості вибірки від $0,1 \Theta$ до $0,5 \Theta$

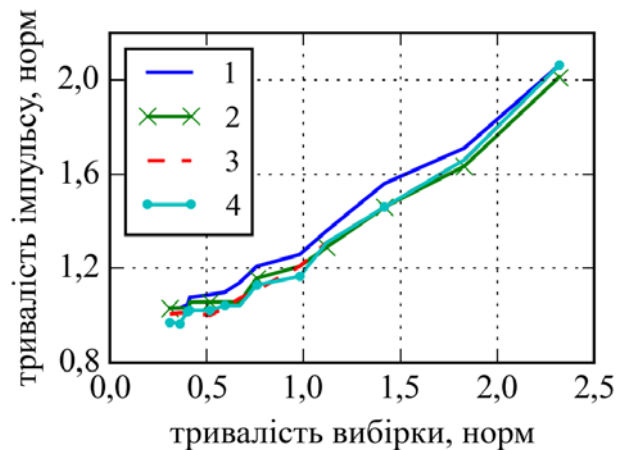
Важливо відзначити, що зазначене зростання амплітуди в залежності від кількості аналогових накопичень є характерним тільки для перетворення імпульсів гаусової форми, тривалість яких менша або порівняна з тривалістю вибірки. Зростання амплітуди не спостерігається при перетворенні сигналу типу перепаду напруги, або коли тривалість вибірки набагато менша від тривалості самого сигналу.

При дослідженнях ступеня впливу тривалості вибірки на

можливість спостерігати окремо два імпульси показано, що зі збільшенням тривалості вибірки крім зростання амплітуди сигналів відбувається збільшення їх тривалості і, як наслідок, взаємне перекриття цих імпульсів (рис. 10).



а)



б)

Рис. 9 Залежність а) відносної пікової амплітуди, б) відносної тривалості перетвореного імпульсу від відносної тривалості вибірки при аналоговому накопиченні: 1 – 1, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7

Для формальної оцінки можливості роздільного спостереження імпульсів використано відношення мінімуму (С) до максимуму (А) амплітуди сигналу (рис. 10) та його залежність від тривалості вибірки (рис. 11).

Це дослідження показало, що застосування аналогового накопичення не тільки збільшує коефіцієнт передачі перетворювача, а й сприяє розділенню в часі двох перетворених імпульсів, розділених у вхідному сигналі малим часовим інтервалом. Так, при 7-ми кратному накопиченні, тривалість вибірки можна збільшити на 10%, відповідно збільшивши коефіцієнт передачі та зменшивши рівень приведенного до входу шуму, і залишити співвідношення між мінімумом (С) та максимумом (В) незмінним (рис. 11).

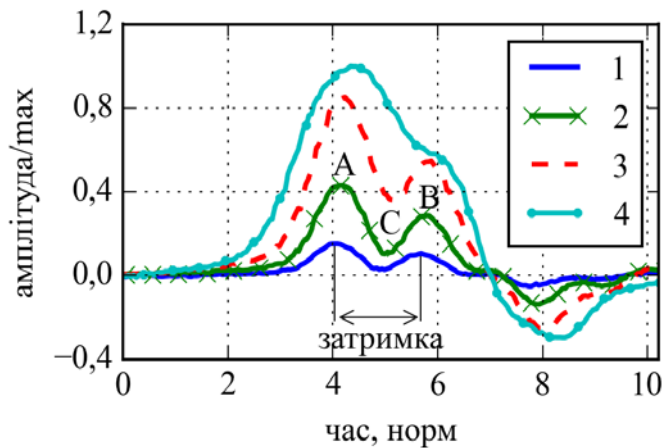


Рис. 10 Часові залежності перетворених імпульсів при відносних тривалостях вибірки: 1 – 0,4; 2 – 0,6; 3 – 1,1; 4 – 2,3

потужних коротких імпульсів із короткими фронтами, відбитих від приповерхневих об'єктів, так і малопотужних більш тривалих імпульсів з великими часом наростання (спаду), відбитих від об'єктів, які знаходяться на великих глибинах. Показано, що цей спосіб дозволяє розширити динамічний діапазон приймача НШС імпульсного радіолокатора підповерхневого зондування й адаптувати радар під закон поглинання та дисперсії в ґрунті.

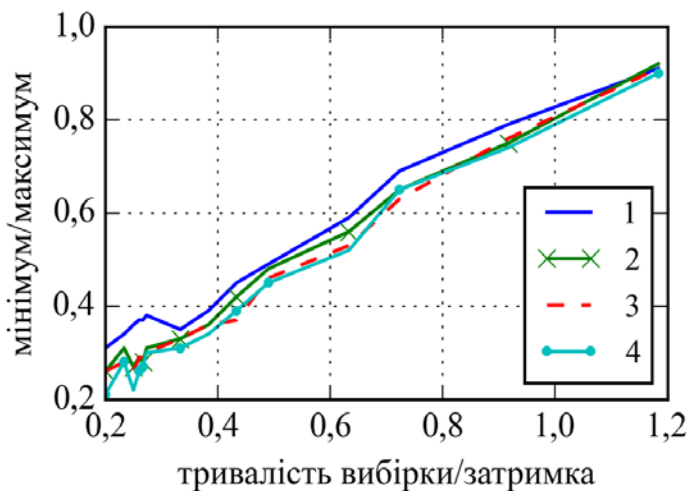


Рис. 11 Залежність відношення мінімуму до максимуму амплітуди сигналу від відношення тривалості вибірки до часового інтервалу між піками A і B при накопиченні: 1 – 1, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7

першу чергу було експериментально досліджено цю залежність. Вона виявилась лінійною (рис. 12). Цю закономірність використано при цифровому керуванні тривалістю вибірки в подальших дослідженнях.

У третьому розділі «Стробоскопічне перетворення з адаптацією тривалості вибірки» представлено стробоскопічний спосіб реєстрації імпульсних сигналів із змінною тривалістю вибірки для використання в приймачах відеоімпульсних георадарів. В даному способі застосовано одночасне та взаємообумовлене адаптивне регулювання коефіцієнта передачі та робочої смуги частот стробоскопічного перетворювача в залежності від амплітуди та спектра сигналів. У запропонований спосіб забезпечується реєстрація як більш

З метою дослідження можливостей методу стробоскопічного перетворення зі змінною тривалістю вибірки розроблено спеціальні керовані генератори стробімпульсів субнаносекундного діапазону тривалостей на основі двох діодів з накопиченням заряду (ДНЗ) та змішувач на основі диференційної двохдіодної схеми, визначено критерій оптимальної тривалості вибірки, за яким потрібно адаптувати перетворювач.

Можливість керування тривалістю стробімпульсу забезпечується залежністю тривалості сформованого ДНЗ імпульсу від прямого струму через діод. Тому в

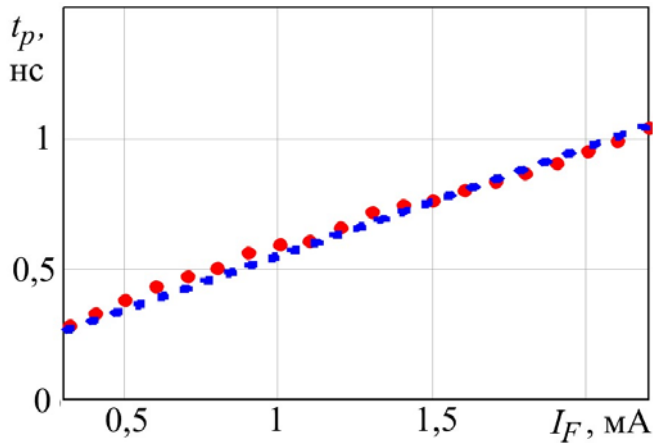


Рис. 12 Залежність тривалості імпульсу на рівні $V_s/2$ від прямого струму ДНЗ: експериментальні дані (●) і її апроксимація поліноміальною функцією (— — —)

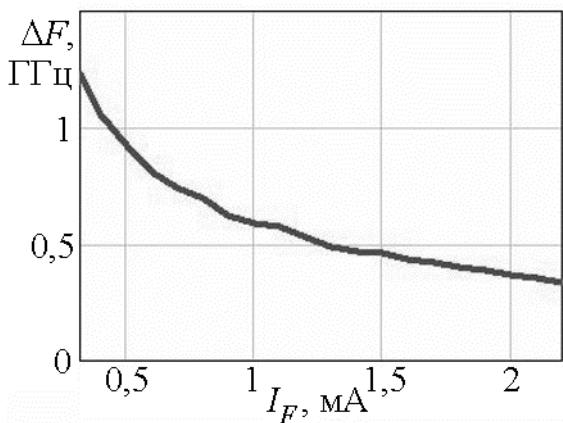


Рис. 13 Експериментально визначена залежність робочої смуги частот стробперетворювача від прямого струму I_F через ДНЗ

Шляхом регулювання величини прямого струму через ДНЗ в межах від 0,3 мА до 2,2 мА вдалося змінювати тривалість стробімпульсу в межах від 0,3 нс до 1,2 нс, що відповідає можливості регулювання верхньої граничної частоти робочої смуги частот стробоскопічного перетворювача в межах від 1,2 ГГц до 300 МГц (рис. 13).

Для подальших експериментальних досліджень було створено аналогічний за схемою і принципом керування генератор, але з регулюванням тривалості вибірки в діапазоні від 60 пс до 450 пс.

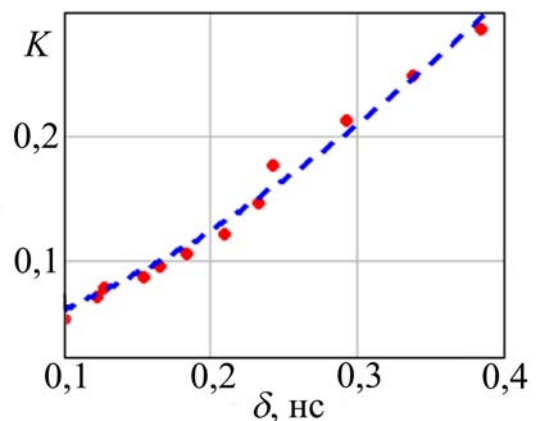


Рис. 14 Залежність коефіцієнта передачі K від тривалості вибірки: експериментальні дані (●) і апроксимуюча крива (— — —)

Створений із цим генератором стробімпульсів стробоскопічний перетворювач забезпечив коефіцієнт передачі від 0,03 при мінімальній тривалості вибірки – 60 пс до більше ніж 0,3 при максимальній тривалості вибірки – 450 нс (рис. 14). Це означає збільшення чутливості до відбиттів від глибинних об'єктів у більш ніж 10 разів у порівнянні з чутливістю до відбиттів від приповерхневих об'єктів. Для цього перетворювача визначено залежність коефіцієнта передачі, часу наростання ПХ та робочої смуги частот від тривалості вибірки (рис. 14, 15).

Крім того, в експериментах було визначено залежність співвідношення сигнал/шум від тривалості вибірки, за якою визначалась залежність рівня шуму, приведенного до входу приймача, від ширини робочої смуги частот. Разом з цим, з'ясовано, що зміна тривалості вибірки в заданих межах дозволяє підвищити співвідношення сигнал/шум з 12,5 до 16,3 (рис. 16), завдяки чому динамічний діапазон приймача може бути розширено ще майже на третину.

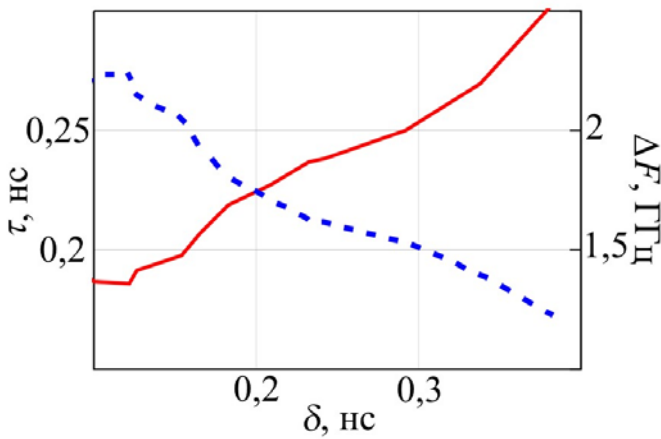


Рис. 15 Залежність часу наростання ПХ (суцільна лінія) і робочої смуги частот приймача (пунктирна лінія) від тривалості вибірки

стробоскопічного приймача у $10 \times 1,3 = 13$ разів (на $\approx 22,3$ дБ).

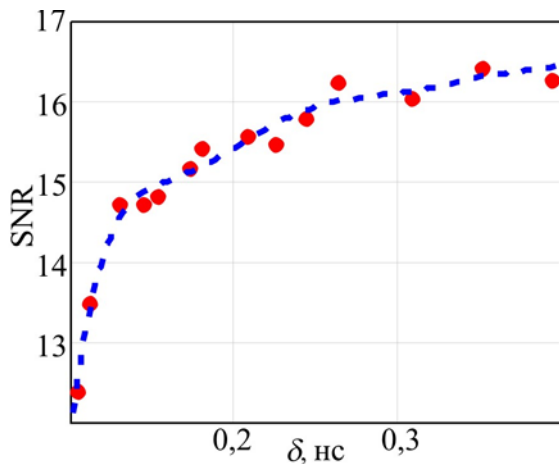


Рис. 16 Залежність співвідношення сигнал/шум (SNR) від тривалості вибірки: експериментальні дані (●) і апроксимуюча крива (— — —)

Окремо в експерименті було досліджено закономірність зміни рівня шуму, приведенного до входу перетворювача, від тривалості вибірки (або робочої смуги частот). Отримані дані ілюструє рис. 17. Цей експеримент дозволив оцінити абсолютні значення рівня шуму у створеному стробперетворювачі.

Таким чином, зміна коефіцієнту передачі (у 10 разів) разом із збільшенням сигнал/шум на третину, які забезпечуються у часовому вікні спостереження, дозволили досягти розширення динамічного діапазону

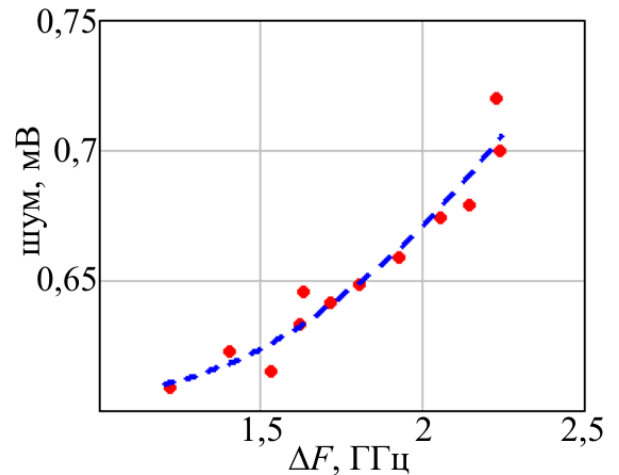


Рис. 17 Залежність рівня шуму від ширини робочої смуги частот приймача: експериментальні дані (●) і апроксимуюча крива (— — —)

Відтворення форми сигналу в еквівалентному часі. З огляду на важливість співпадиння форми імпульсу у реальному й еквівалентному часі, необхідно визначити об'єктивний критерій, який забезпечить можливість проведення таких порівнянь. Далі розглянуто кореляційний критерій як критерій оптимізації стробоскопічного перетворення для адаптації тривалості вибірки при перетворенні сигналу з шумом.

Оскільки в попередньому дослідженні з'ясовано, що збільшення тривалості вибірки дозволяє підвищити коефіцієнт передачі та зменшити рівень шуму, приведенного до входу перетворювача, постає питання щодо того, до якої величини можна збільшити тривалість вибірки, і при цьому не спотворити форму імпульсу.

З метою оцінювання ступеня спотворення форми імпульсу при перетворенні запропоновано порівняння коефіцієнтів кореляції Пірсона R_{U,u_i} вихідного і

перетвореного імпульсів за різних умов стробоскопічного перетворення:

$$R_{U,u_i} = \frac{\text{cov}(U, u_i)}{\sigma_U \sigma_{u_i}}, \quad (5)$$

де $\text{cov}(U, u_i)$ – коваріація сигналів $U(t)$ і $u_i(t)$; σ_U і σ_{u_i} – стандартне відхилення $U(t)$ та $u_i(t)$ відповідно. Чим ближче значення коефіцієнта кореляції до 1, тим точніше перетворений імпульс відтворює форму вхідного імпульсу.

Шум є тим основним чинником, який обмежує динамічний діапазон приймача. Тому, треба з'ясувати яка тривалість вибірки є оптимальною з точки зору забезпечення чутливого неспотвореного прийому.

В роботі на основі модельних розрахунків досліджено залежність кореляції R_{U,u_i} сигналів з шумом і без шуму від тривалості вибірки δ за умов різних співвідношень сигнал/шум.

З використанням моделі стробоскопічного перетворення розраховано і проаналізовано залежності коефіцієнтів кореляційної функції перетвореного сигналу від тривалості вибірки (для трьох типів сигналу). Графіки (рис. 18) демонструють, що збільшення тривалості вибірки при перетворенні сигналу з шумом дозволяє покращити точність відтворення форми імпульсу (криві на графіках рис. 18 мають максимуми). Крім того, для різних співвідношень сигнал/шум оптимальні величини тривалості вибірок – різні.

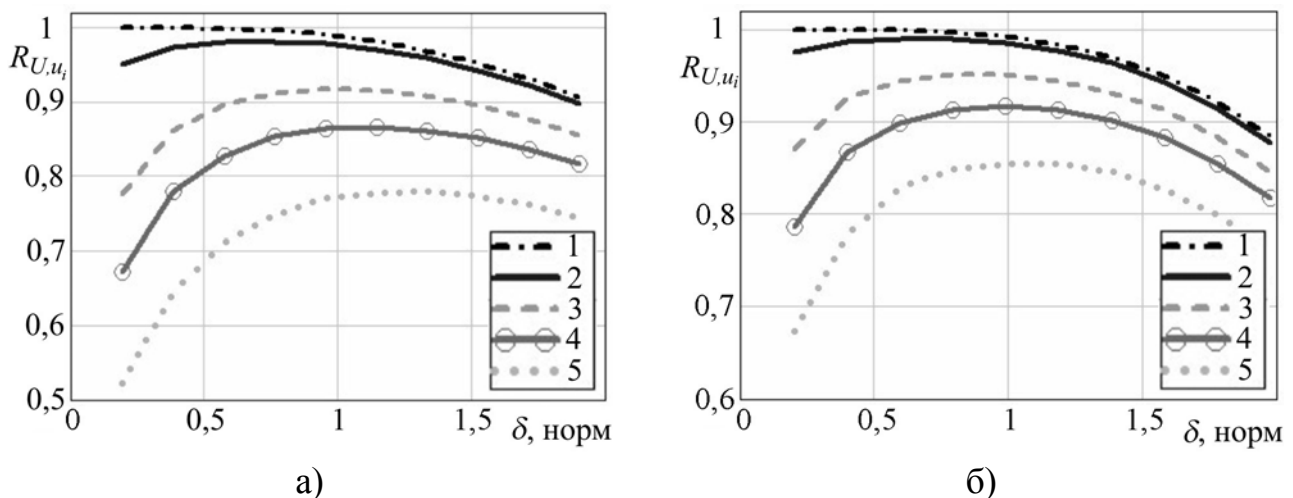


Рис. 18 Залежності коефіцієнта кореляції перетвореного сигналу і вихідного сигналу в формі: а) – гаусіана, б) – похідної гаусіана від тривалості вибірки нормованої на тривалість імпульсу на рівні половини від максимальної амплітуди, при різних рівнях шуму (1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,5; 4 – 0,7; 5 – 1)

Запропонований підхід дозволяє формально і об'єктивно оцінювати ступінь спотворення форми сигналу з шумом при реєстрації, а також визначати оптимальну для даного рівня шуму тривалість вибірки за умов допустимої похибки перетворення сигналу. Крім того, можна визначити тривалість вибірки стробоскопічного перетворювача і оцінити рівень шуму, при якому взаємна кореляція вихідного і перетвореного сигналів є максимальною.

Приклад перетворення сигналу (рис. 19) наочно демонструє результат

використання запропонованого комплексу заходів, спрямованих на досягнення ефективного (з високим коефіцієнтом передачі) неспотвореного (з великим коефіцієнтом кореляції) адаптованого стробоскопічного перетворення сигналу з шумом. Перетворений з оптимальною тривалістю вибірки сигнал майже не відрізняється від сигналу на вході приймача, а співвідношення сигнал/шум значно покращене.

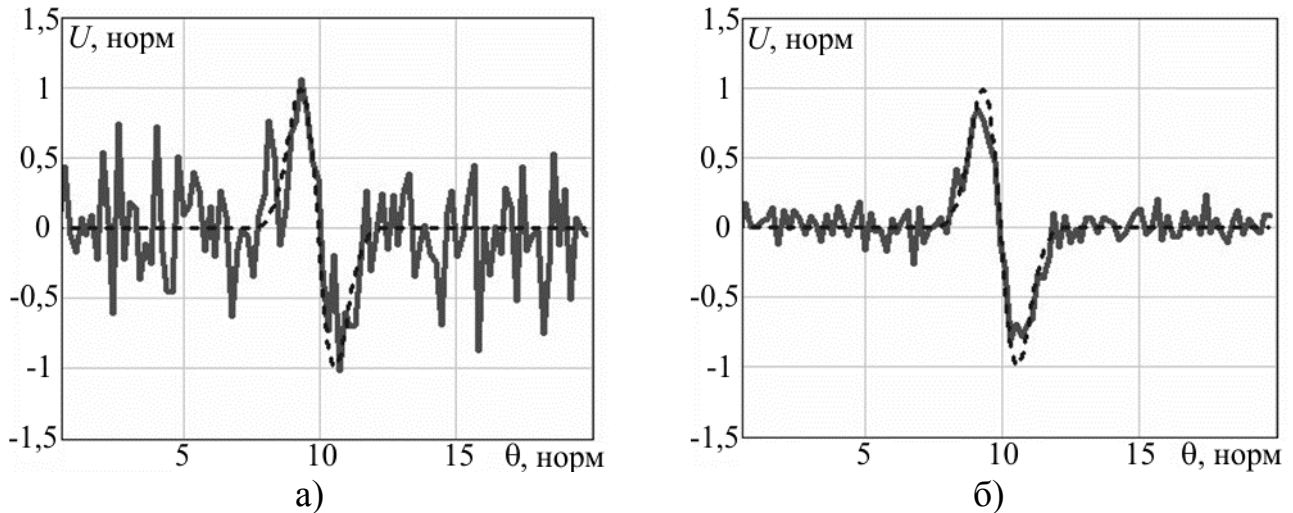


Рис. 19 Перетворені сигнали: а) тривалість вибірки 0,1; б) тривалість вибірки 1; пунктир – сигнал на вході перетворювача; U , θ – нормовані амплітуда та час

Четвертий розділ «Застосування методів адаптації в радіосистемах» присвячено апробації методів адаптації стробоскопічного перетворення в НШС імпульсних радіолокаційних системах. Відповідні експериментальні дослідження були виконані за участі, у тому числі, міжнародних груп фахівців з використанням найсучасніших зразків елементної бази георадарів, в першу чергу георадара «ОДЯГ», в якому вперше впроваджені в практику георадіолокаційного зондування як аналогове накопичення, так і регулювання робочої смуги частот.

Виявлення слабоконтрастного об'єкту під поверхнею ґрунту. В цих експериментах у дослідну групу увійшли вчені Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України та науковці з Electronics and Telecommunication Engineering Dept., Yildiz Technical University, Стамбул (Туреччина).

Нерухомим радаром зондувалась ділянка ґрунту з тунелем, яким рухався малогабаритний слабоконтрастний пластиковий об'єкт. Отримані за умов різних параметрів стробоскопічного перетворення радарограми показано на рис. 20.

Результати цих експериментів продемонстрували можливості стробоскопічного перетворювача з адаптованою тривалістю вибірки і аналоговим накопиченням. На відміну від рис. 20 (1), (2) на радарограмах рис. 20 (3), (4) контрастно спостерігаються похилі лінії між точками «start» та «stop», що являють собою виявлене відбиття від підповерхневого об'єкта, який рухається (віддаляється) тунелем. (Параметри перетворення для кожного випадку надано на рисунку). В результаті оптимізації параметрів стробперетворення збільшено енергетичний потенціал радара та підвищено співвідношення сигнал/шум, що надало можливість виявити слабконтрастний об'єкт.

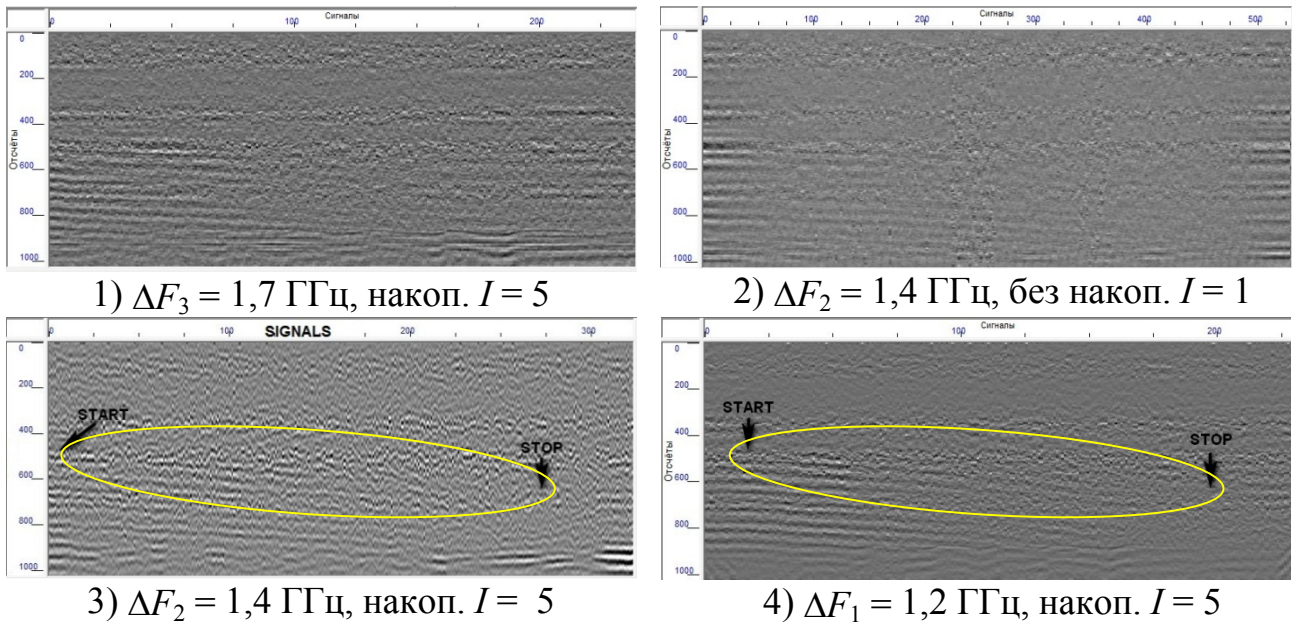


Рис. 20 Радарограми, отримані в експериментах з діелектричним об'єктом

Мікрохвильова томографія. Визначення перетину підповерхневої структури ґрунту. В рамках міжнародного проєкту «Активні і пасивні мікрохвилі для безпеки і підповерхневого зондування» (AMISS) Marie Curie Actions IRSES (PIRSSES-GA-2010-269157) Сьомої рамкової європейської програми спільно з італійськими колегами з Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico Dell'ambiente – National Research Council of Italy (IREA-CNR), Неаполь (Італія), були проведені дослідження щодо пошуку та ідентифікації підповерхневих об'єктів з використанням георадара і цифрової обробки сигналів методом мікрохвильової томографії. Рис. 21 а) схематично демонструє полігон для георадіолокаційного зондування.

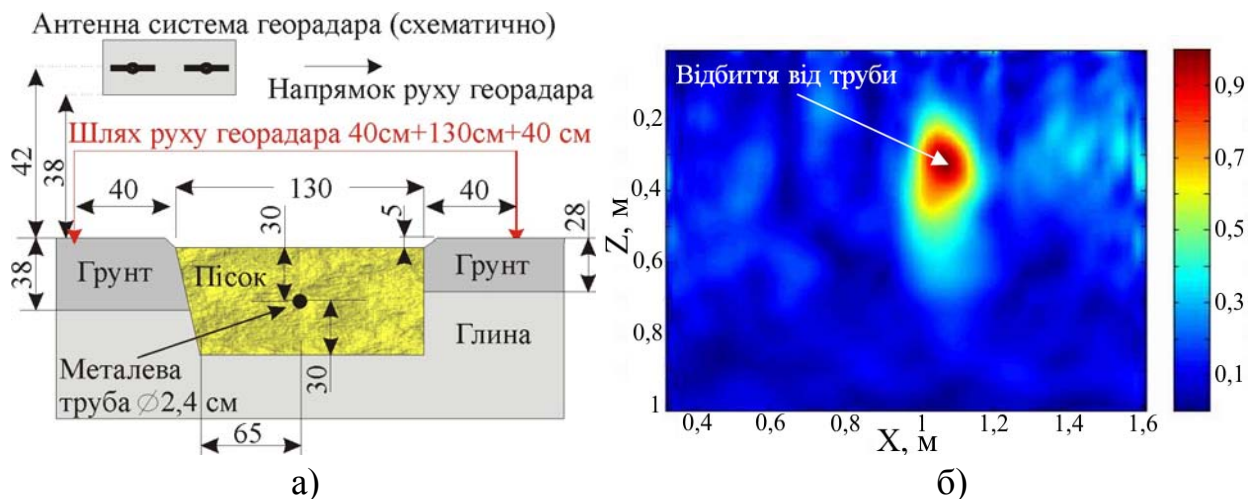


Рис. 21 Профіль досліджуваної ділянки для збору георадіолокаційних даних а) та відновлений переріз підповерхневої структури ґрунту б)

Дані, зібрані з використанням оптимізації тривалості вибірки в перетворювачі, дозволили настільки точно зареєструвати імпульси електромагнітного поля, розсіяні середовищем, що, завдяки цьому, виявилось можливим успішно застосувати метод мікрохвильової томографії для обробки георадіолокаційної інформації і коректно відновити переріз ґрунту (рис. 21 б).

Вимірювання товщини шарів шаруватого середовища. Для забезпечення можливості точного вимірювання товщини шарів дорожнього одягу (за будівельними нормами точність має бути не гірше за 5 мм) і, при цьому, для виявлення слабоконтрастних шарів потрібні радіолокаційні системи з дуже стабільними параметрами і великим динамічним діапазоном. Прикладом такої апаратури є георадар «ОДЯГ-4», розроблений за участю автора дисертації в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України під час виконання госпдоговірних НДР. Основні удосконалення, внесені при виконанні цих НДР, були спрямовані на збільшення динамічного діапазону стробоскопічної приймальної системи.

Випробування георадара були проведені за участю представників підприємства «Дор'якість» під час приймальних робіт на двох ділянках ремонтної дороги Київ – Довжанський. Результати георадіолокаційних вимірювань оброблено за допомогою розробленого в ХНУ імені В. Н. Каразіна (м. Харків) програмного забезпечення «Geovisu», в якому використано алгоритм визначення товщини шарів дорожнього одягу, заснований на розв'язанні оберненої задачі – відновлення електрофізичних і геометричних параметрів шаруватого середовища за параметрами розсіяного НШС імпульсного електромагнітного поля. Контроль товщини шарів виконувався стандартним для дорожнього будівництва способом – за керном.

Точність визначення товщини шарів дорожнього одягу можна оцінити з таблиці 1.

Таблиця 1

Результати випробувань

Показники	Фактичне значення за керном в см	Розрахункове значення за результатами георадарного дослідження в см
Ділянка дороги «519 км»		
Товщина пакету асфальтобетонних шарів	10,5	10,12
Товщина першого і другого шарів покриття	Верхній шар – 5,5 Нижній шар – 5,0	Верхній шар – 5,17 Нижній шар – 4,94
Ділянка дороги «528 км»		
Товщина першого, другого і третього шарів покриття	Верхній шар – 6,0 Другий шар – 4,0 Третій шар – 4,0	Верхній шар – 5,99 Другий шар – 4,09 Третій шар – 3,91

Вимірювання характеристик антен без використання безлунових камер. НШС імпульсний метод дозволяє точно вимірювати характеристики антенних систем без використання коштовних безлунових камер. Тобто, вимірювання у частотній області можна замінити вимірюваннями у часовій області з подальшим визначенням частотних характеристик за допомогою перетворення Фур'є.

При виконанні НДР конкурсної тематики за участю автора дисертації було створено комплекс для вимірювання характеристик антен НШС імпульсним методом. Основа створеного комплексу – це стробоскопічний приймач, який реєструє амплітудно-часову залежність коротких імпульсів з високою точністю.

Для тестування комплексу було зібрано дані щодо випромінювання імпульсних

сигналів дипольною Bow-Tie антеною, розміри якої ($440 \times 200 \text{ мм}^2$) перевищують просторову тривалість імпульсу збудження. Такі розміри антени є причиною появи особливостей в діаграмах спрямованості антени.

Для контролю коректності результатів вимірювань, за результатами розв'язання електродинамічної задачі було обчислено діаграми спрямованості такої антени для кількох частот з діапазону вимірювань. Порівняння результатів демонструє рис. 22.

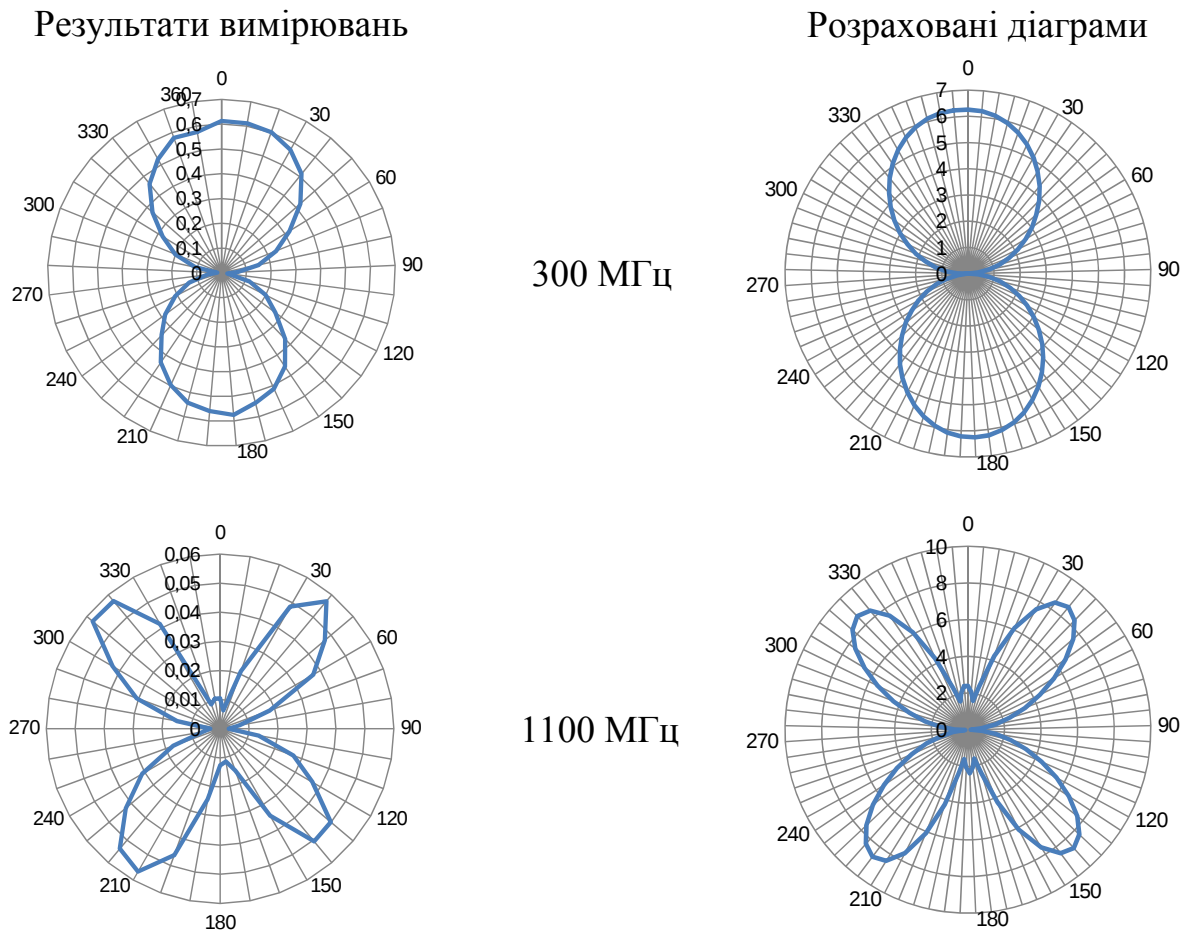


Рис. 22 Діаграми спрямованості антени Bow-Tie

Особливості діаграм спрямованості Bow-Tie антени (форма, наявність і розташування пелюсток) підтвердили точність результатів вимірювань.

На додаток, НШС імпульсний метод, завдяки обмеженню часу спостереження випроміненого сигналу, звільняє від реєстрації полів, відбитих оточуючими предметами. Тому з'являється можливість дуже точних вимірювань. Експериментально показана можливість вимірювання коефіцієнтів зв'язку між поряд розташованими антенами на рівні – 65 дБ і більше, що свідчить про якість приймальної апаратури, розробленої під час досліджень за темою дисертації, і застосованої в НШС імпульсному методі вимірювання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розробки методів адаптації параметрів стробоскопічного перетворення для розширення динамічного діапазону приймача НШС імпульсної радіолокаційної системи.

На підставі результатів досліджень було зроблено такі висновки:

1. Застосування вибірок збільшеної тривалості дозволяє знизити рівень шуму, приведенного до входу змішувача, і збільшити коефіцієнт передачі змішувача. Протягом більш тривалої вибірки істотно «згладжуються» шумові флуктуації, а також збільшується кількість заряду (і, відповідно, частина енергії вхідного імпульсу), що надходить до накопичувальної ємності. Сукупним ефектом є істотне підвищення співвідношення сигнал/шум і збільшення динамічного діапазону стробоскопічної приймальної системи (в експериментах досягнуто збільшення на $\approx 22,3$ дБ).

2. Вперше за результатами математичного моделювання процесу стробоскопічного перетворення сигналів при аналоговому накопиченні показано зменшення часу наростання перехідної характеристики стробоскопічного перетворювача і, відповідно, розширення його робочої смуги частот внаслідок аналогового накопичення. Цей ефект властивий стробоскопічним перетворювачам, які функціонують саме в режимі з неповним зарядом накопичувальної ємності, і спостерігається тоді, коли тривалість вибірки мала в порівнянні зі сталою часу заряду накопичувальної ємності. Експерименти підтвердили коректність результатів теоретичного аналізу.

3. Вперше запропоновано спосіб корекції методу оцінки джитера, який ґрунтується на аналізі амплітудних помилок перетвореного сигналу, шляхом відновлення реальної амплітуди сигналу за двома сусідніми вибірками з урахуванням коефіцієнта передачі і коефіцієнта втрат змішувача стробоскопічного перетворювача, які визначаються за результатами додаткових незалежних вимірювань. Спосіб корекції є орієнтованим на використання в стробперетворювачах із неповним зарядом накопичувальної ємності.

4. Вперше запропоновано спосіб стробоскопічного перетворення (патент України № 96241), в якому тривалість вибірки збільшується від початку до кінця часу спостереження таким чином, щоб реєструвати відбиті приповерхневими об'єктами сигнали з більшою потужністю та з ширшим спектром, використовуючи коротші вибірки, а сигнали відбиті об'єктами, які залягають глибоко, реєструвати зі збільшеною тривалістю вибірки. Це, в сукупності, призводить до підвищення чутливості приймача радіолокаційної системи, звуження динамічного діапазону амплітуд прийнятих сигналів і зміни робочої смуги частот відповідно до закону дисперсії в ґрунті.

5. В дисертації запропоновано новий спосіб визначення оптимальних параметрів стробоскопічного перетворення сигналу з шумом, який базується на порівнянні вхідного та перетвореного імпульсів з використанням кореляції Пірсона.

6. Практичне застосування адаптованого стробоскопічного перетворення забезпечило, по-перше, збільшення динамічного діапазону приймальних систем локаторів, а по-друге, довело, що форма зареєстрованих сигналів цілком відповідає тим, які надходять до входу стробперетворювача. Інакше коректне розв'язання обернених задач було б неможливим.

7. Створені стробоскопічні НШС імпульсні приймачі також продемонстрували придатність для вимірювання характеристик антенних систем в широкій смузі частот і широкому динамічному діапазоні амплітуд сигналів.

Отримані в дисертації результати є базовими для розробки високочутливих приймальних систем НШС радіолокаторів, в основі яких лежить стробоскопічне перетворення імпульсних сигналів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у фахових виданнях України:

1. Kholod P. V., **Ruban V. P.** The Sampler of the Videopulse Georadar // Radio Physics and Radio Astronomy. 2002. Vol. 7, No. 4. P.424–430. (*Особистий внесок здобувача: розробка експериментального макета стробоскопічного змішувача відеоімпульсного радіолокатора, робота над текстом статті*).

2. Петrenchенко С. Н., Почанин А. Г., Почанин Г. П., **Рубан В. П.** Автоматизированный комплекс для измерений характеристик сверхширокополосных антенн // Радиофизика и электроника. 2005. Т. 10, № 2. С. 233–239. (*Особистий внесок здобувача: розробка стробоскопічного приймача вимірювального комплексу, робота над текстом статті*).

Наукові праці в зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

3. **Ruban V. P.**, Shuba A. A., Pochanin A. G., Pochanin G. P. Signal Sampling with Analog Accumulation // Telecommunications and radio engineering. 2015. Vol. 74, Is. 6. P. 515–525. (Scopus). (*Особистий внесок здобувача: самостійна реалізація обчислювальних алгоритмів для теоретичної моделі стробоскопічного перетворювача, проведення експериментів з перетворення НШС сигналів перетворювачем для дослідження впливу змінюваної тривалості вибірки й аналогового накопичення, робота над текстом статті*).

4. **Ruban V. P.** Jitter of synchronization of the stroboscopic converter // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75, Is. 9. P. 789–800. (Scopus).

5. Pochanin G. P., Masalov S. A., **Ruban V. P.**, Kholod P. V., Batrakov D. O., Batrakova A. G., Varianytsia-Roshchupkina L. A., Urdzik S. N. Pochanin O. G. Advances in Short-Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying // Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications : collective monograph / ed. by J. D. Taylor / London : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. P. 19–64. (Scopus). (*Особистий внесок здобувача: розробка та створення стробоскопічного приймача георадара з малим рівнем джитеру синхронізації та можливістю керування тривалістю вибірки, аналіз і формулювання критеріїв для визначення оптимальних параметрів стробоскопічного перетворення сигналів при наявності шуму, робота над текстом*).

6. Persico R., Pochanin G., **Ruban V.**, Orlenko A., Catapano I., Soldovieri F. Performances of a Microwave Tomographic Algorithm for GPR Systems Working in Differential Configuration // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9, Is. 4. P. 1343–1356. (Scopus та Web of Science). (*Особистий внесок здобувача: розробка експериментальних макетів стробоскопічних приймачів відеоімпульсних радіолокаторів, обробка та аналіз результатів зондування, робота над текстом статті*).

Наукові праці у зарубіжних спеціалізованих виданнях:

7. Pochanin G. P., **Ruban V. P.**, Kholod P. V., Shuba A. A., Pochanin A. G., Orlenko A. A., Batrakov D. O., Batrakova A. G. GPR for pavement monitoring // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 1. 881 кВ. (*Особистий внесок здобувача: розробка експериментальних макетів стробоскопічних приймачів відеоімпульсних*

радіолокаторів, попередня обробка і аналіз результатів зондування, робота над текстом статті).

Наукові праці апробаційного характеру:

8. **Ruban V. P.**, Pochanin G. P. Sampling duration for noisy signal conversion // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of 5th Intl. Conf. UWBUSIS, 6–10 Sept. 2010, Sevastopol, 2010. P. 275–277. (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: моделювання процесу стробоскопічного перетворення сигналів з шумом, аналіз методики оптимізації параметрів стробоскопічного перетворення, робота над текстом).*

9. **Ruban V. P.**, Shuba O. O. Sampling pulse width versus forward current in the step recovery diode // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of 6th Intl. Conf. UWBUSIS, 17–21 Sept. 2012, Sevastopol, 2012. P. 72–74. (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: розробка генератора на ДНЗ, проведення експериментів та аналіз процесів формування коротких імпульсів, робота над текстом).*

10. **Ruban V. P.**, Shuba O. A., Pochanin G. P. The GPR receiver. Sync stability // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : XII Kharkiv Young Scientist Conference, 4–7 Dec. 2012. : abstr. Kharkiv, 2012. P. 1. (Scopus та Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: розробка високостабільної схеми синхронізації стробоскопічного перетворювача, розробка методики та проведення вимірювань, аналіз даних, робота над текстом).*

11. Pochanin G. P., **Ruban V. P.**, Kholod P. V., Shuba A. A., Pochanin A. G., Orlenko A. A. Enlarging of power budget of ultrawideband radar // Recent Advances in Space Technologies : Proceedings of 6th Intl. Conf. RAST-2013, 12–14 June 2013, Istanbul, Turkey, 2013. P. 213–216. *(Особистий внесок здобувача: аналіз можливостей розширення динамічного діапазону георадара, розробка прийомного блоку з керованою тривалістю вибірки та модуля синхронізації стробоскопічного перетворювача, проведення вимірювань для оцінки джитера синхронізації приймача георадара, та реєстрації сигналів з мінімальними спотвореннями, аналіз даних, робота над текстом).*

12. Pochanin G. P., **Ruban V. P.**, Batrakova A. G., Urdzik S. N., Batrakov D. O. Measuring of thickness of asphalt pavement with use of GPR // International radar symposium : Proceedings of 15th Intl. Conf. IRS, 16–18 June 2014, Gdansk, Poland, 2014. P. 452–455. (Scopus та Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: розробка стробоскопічного приймача георадара та адаптація його параметрів з урахуванням специфіки вимірювань, робота над текстом).*

13. **Ruban V. P.**, Shuba O. O., Pochanin O. G., Pochanin G. P., Turk A. S., Keskin A. K., Dagcan S. M., Caliskan A. T. Analog Signal Processing for UWB Sounding // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of 7th Intl. Conf. UWBUSIS, 15–19 Sept. 2014, Kharkiv, 2014. P. 55–58. *(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів з адаптації робочої смуги частот георадара та аналогового накопичення, аналіз отриманих результатів зондування, робота над текстом).*

14. **Ruban V. P.**, Pochanin G. P., Shuba O. O., Pochanin O. G. GPR Receiver with Adjustable Frequency Bandwidth // International Workshop on Advanced Ground

Penetrating Radar : Proceedings of 8th Intl. Conf. IWAGPR 15, 7–10 July 2015, Florence, Italy, 2015. P. 1–4. (Scopus та Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів з перетворення сигналів, аналіз характеристик та параметрів перетворювача зі змінною тривалістю вибірки, робота над текстом).*

15. **Ruban V. P.**, Pochanin G. P., Pochanin O. G., Shuba O. O. Sampling conversion of the short impulse signals at extended sample width // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of 8th Intl. Conf. UWBUSIS, 5–11 Sept. 2016, Odessa, 2016. P. 142–144. (Scopus та Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: проведення експериментів стробоскопічного перетворення зі змінюваною тривалістю вибірки, обробка та аналіз даних вимірювань, робота над текстом).*

16. Pochanin G. P., **Ruban V. P.**, Orlenko O. A., Korzh V. G., Andreev M. V., Drobakhin O. O. Antenna pattern measurements: UWB impulse and multifrequency signals Comparison // International Conference on Antenna Theory and Techniques : Proceedings of XI- Intl. Conf. ICATT'17, 24–27 May 2017, Kyiv, 2017. P. 1–4. (Scopus та Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: розробка оптимізованого приймача для НШС вимірювального комплексу, проведення експериментів, робота над текстом).*

Патенти:

17. Стробоскопічний спосіб реєстрації сигналів: пат. 96241 Україна. № а201014689 ; заявл. 07.12.2010 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19. 4 с. *(Особистий внесок здобувача: виконання патентного пошуку і складання формули винаходу).*

АНОТАЦІЯ

Рубан В. П. Адаптоване стробоскопічне перетворення відеоімпульсних сигналів у радіолокаційних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального наукового завдання – розробці методів адаптації параметрів стробоскопічного перетворення для розширення динамічного діапазону приймача НШС імпульсної радіолокаційної системи.

У роботі досліджено вплив тривалості вибірки, аналогового накопичення, нестабільності синхронізації на перехідну характеристику (смугу робочих частот), шумові характеристики, коефіцієнт передачі стробоскопічного перетворювача з неповним зарядом накопичувальної ємності. Керована зміна тривалості вибірки і, як наслідок, управління шириною робочої смуги частот стробоскопічного приймача георадара дозволяє змінювати динамічний діапазон приймача, підвищуючи його чутливість і оптимізуючи комплекс параметрів усього георадара, пов'язаних із його роздільною здатністю.

Ключові слова: НШС імпульсний радар, георадар, стробоскопічний перетворювач, тривалість вибірки, чутливість, НШС імпульсні сигнали, динамічний діапазон.

ABSTRACT

Ruban V.P. Adaptable stroboscopic conversion of video-pulse signals in radar systems. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in physical and mathematical sciences. Speciality 01.04.01 – physics of devices, elements, and systems. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The dissertation is dedicated to the urgent scientific task, which is developing the basics of adapting the stroboscopic conversion parameters to expand the dynamic range of the UWB receiver of a pulsed radar system.

The influence of sample width, analog accumulation, synchronization instability (jitter) on the transient response (operating frequency band), noise characteristics, the transmission coefficient of a stroboscopic converter with an incomplete charge of the storage capacitance is studied. The effect of charge losses in the storage capacity during the storage at the converter characteristics was also evaluated. A stroboscopic method with a variable sample width is proposed for recording UWB pulsed signals based on these studies. A controlled change in the sampling width and, thus, control of the working bandwidth of the stroboscopic GPR receiver allows changing the dynamic range of the radar receiver, increasing its sensitivity and optimizing the set of parameters of the entire GPR related to its resolution.

It is also shown that in the case of using a stroboscopic converter with an incomplete charge of the storage capacity, analog accumulation reduces the rise time of the transient response and, consequently, expands the receiver operating frequency band.

The jitter determination method for stroboscopic converters operating in the mode of incomplete charge of the storage capacity has been improved in the work. It allowed us to evaluate the synchronization jitter for these type of receivers correctly.

The dissertation presents the results of the approbation of the method of adaptation of stroboscopic conversion. They were obtained during the research and fulfillment of a number of practically important tasks. It is experimentally demonstrated that applying the method of adaptation of the conversion sample width in ground penetrating radar allows increasing the detecting probability for subsurface objects with close to the environment electrophysical parameters, as well as to obtain fairly accurate GPR data, which are suitable for further correct solving of inverse electrodynamics problems such as forms of subsurface objects determination and determination of the spatial distribution of the media electrophysical parameters.

The practical value of the obtained results is that the developed methods of adaptable stroboscopic conversion improve the quality of raw radar data and, thus, increase the accuracy of results of UWB impulse radar measurements and expand the scope of possible applications of UWB impulse radar methods for solving the radiointroscopy problems.

Keywords: UWB impulse radar, ground penetrating radar (GPR), sampler (stroboscopic converter), sample width, sensitivity, UWB impulse signals, dynamic range.