

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/15>**Сайко В.Г.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Радзівілов Г.Д.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Станілога О.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ У ТЕРАГЕРЦОВИХ РАДІОДАТЧИКАХ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У статті представлено результати дослідження та розроблення узагальненої програмно-аналітичної моделі для оброблення FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні частот, що дозволяє забезпечити високу точність оцінювання дальності та просторових параметрів об'єктів у сенсорних і комунікаційних системах нового покоління. Актуальність роботи зумовлена зростаючим інтересом до застосування THz-діапазону в бездротових мережах та безконтактних системах спостереження, де класичні радіотехнічні підходи втрачають ефективність через високий рівень поглинання та дисперсії сигналів. Метою дослідження є створення методики, яка забезпечує синтез математичного моделювання FMCW-сигналів та аналізу реальних вимірних IQ-даних із використанням спектроаналізатора Spectran V6 у поєднанні із засобами цифрової обробки сигналів у MATLAB. Запропонований підхід включає застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT), інтерполяційних методів визначення пікових компонент та фазового уточнення оцінки дальності, що дозволяє мінімізувати помилки ідентифікації частотної модуляції та фазових зсувів у середовищі із суттєвими втратами. Отримані результати експериментальної апробації показали, що комбіноване використання частотного і фазового аналізу дозволяє знизити середньоквадратичну похибку визначення дальності більш ніж удвічі порівняно з базовими спектральними методами, які не враховують фазову інформацію. Додатково проведено оцінювання впливу атмосферного поглинання, температурної нестабільності та параметрів антенних трактів на загальну точність вимірювання. Практична значущість запропонованої методики полягає в можливості її використання для калібрування FMCW-сенсорів терагерцового діапазону, створення навчально-лабораторних комплексів для інженерної підготовки, а також у розробленні нових безконтактних систем моніторингу об'єктів у реальному часі. Методика може виступати основою для подальшого впровадження адаптивних алгоритмів обробки та методів машинного навчання для підвищення точності оцінок у динамічно змінних умовах середовища.

Ключові слова: FMCW-сигнал, терагерцовий сенсор, спектральний аналіз, MATLAB, Spectran V6, інтерполяція, фазове уточнення, IQ-дані.

Постановка проблеми. Терагерцовий (ТГц) діапазон електромагнітного спектра, що охоплює частоти від 0.1 до 10 ТГц, відкриває унікальні можливості для створення високоточних

сенсорних систем, неруйнівного контролю, безконтактних вимірювань і безпечного сканування об'єктів. Сучасні тенденції розвитку терагерцової техніки зосереджені на мініатюризації радіо-

одатчиків та підвищенні ефективності цифрової обробки сигналів. Особливої актуальності набувають радіодатчики на основі FMCW-сигналів (Frequency Modulated Continuous Wave), які забезпечують одночасне визначення відстані та швидкості об'єкта.

Проблема підвищення точності вимірювань у таких системах пов'язана з низкою факторів – зокрема, нелінійністю модуляції, фазовими спотвореннями, шумами приймача та обмеженою роздільною здатністю перетворювачів. Тому зростає потреба у використанні адаптивних алгоритмів цифрової обробки сигналів, які забезпечують покращення співвідношення сигнал/шум, фазову корекцію, підвищення точності вимірювання дальності та стабільність роботи в широкому динамічному діапазоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками відзначається значний прогрес у створенні терагерцових сенсорних систем. Роботи [1–3] присвячені розробці мініатюрних FMCW-радарів із високою частотною лінійністю та низьким рівнем фазових шумів. У дослідженнях [4–6] запропоновано методи компенсації нелінійності частотної розгортки, що базуються на цифровій фазовій корекції та використанні опорних еталонних сигналів. Згідно з [7–9], застосування алгоритмів *matched filtering* і *phase refinement* забезпечує зменшення похибки оцінки дальності до 20–30 % порівняно зі стандартними FFT-методами.

Дослідження у [10–12] демонструють ефективність використання адаптивних методів цифрової обробки – зокрема фільтрації Вінера, LMS-та RLS-алгоритмів – для зниження рівня шуму та компенсації нестабільностей у терагерцових системах. Водночас, у [13–18] розглянуто інтеграцію штучних нейронних мереж і методів машинного навчання для адаптивного налаштування порогів детекції, що значно підвищує чутливість та селективність сенсорів.

Однак попри суттєві досягнення, питання адаптивного підвищення точності FMCW-радіодатчиків у терагерцовому діапазоні залишається відкритим. Потребують подальшого дослідження питання розробки комплексних алгоритмів цифрової обробки, які поєднують фазову, частотну та часову адаптацію для одночасного зменшення похибок та покращення метрологічних характеристик.

Постановка завдання. У сучасних інформаційно-вимірювальних системах зростає потреба у підвищенні точності, швидкодії та завадостій-

кості під час визначення просторових параметрів об'єктів. Особливу увагу приділяють терагерцовому (ТГц) діапазону, який забезпечує високу роздільну здатність при малих довжинах хвиль і має перспективи застосування в безконтактних сенсорних технологіях, системах безпеки, медичній діагностиці та телекомунікаціях нового покоління.

Разом із тим, ефективна обробка сигналів у ТГц-діапазоні вимагає нових методичних підходів до виявлення, фільтрації та аналізу спектрально-часових характеристик. Класичні алгоритми радіолокаційної обробки (наприклад, на основі перетворення Фур'є або кореляційних методів) часто не забезпечують достатньої точності в умовах високого рівня шумів, нестабільності частоти генератора та нелінійних спотворень каналу.

У зв'язку з цим виникає наукова задача розроблення методики цифрової обробки терагерцового FMCW-сигналу, яка забезпечує:

- підвищення точності визначення відстані до об'єкта за рахунок поетапного вдосконалення процесів демодуляції, спектрального аналізу та фазового уточнення;
- зменшення похибки визначення частоти побічних компонент за наявності шуму та відбиттів;
- інтеграцію алгоритмів цифрової фільтрації, пікової інтерполяції та узгодженого фільтрування у єдину структурно-алгоритмічну модель;
- можливість подальшої реалізації методики в апаратному середовищі мініатюрного радіодатчика.

Таким чином, **метою дослідження** є створення методики цифрової обробки терагерцового FMCW-сигналу, що дозволяє підвищити точність вимірювання відстані до об'єкта та покращити співвідношення сигнал/шум у системах терагерцового діапазону.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **основні задачі**:

1. Проаналізувати існуючі методи цифрової обробки FMCW-сигналів і визначити їх обмеження в терагерцовому діапазоні.
2. Розробити поетапну методику, що включає процедури *de-chirp*, FFT-аналізу, пікової інтерполяції, фазового уточнення та узгодженого фільтрування.
3. Провести моделювання та оцінити вплив параметрів сигналу (діапазону частот, тривалості імпульсу, рівня шуму) на точність вимірювання.
4. Обґрунтувати доцільність використання розробленої методики для створення мініатюр-

ного терагерцового радіодатчика з адаптивною цифровою обробкою сигналів.

Виклад основного матеріалу.

Методика обробки FMCW-сигналу та її програмна реалізація в MATLAB

Розроблена методика призначена для цифрової обробки сигналів терагерцового FMCW-сенсора з метою точного визначення відстані до об'єктів. Вона реалізує повний цикл перетворень від формування переданого сигналу до отримання уточнених результатів вимірювання, включаючи етапи моделювання, спектрального аналізу, інтерполяції та фазового уточнення.

Загальна структура методики

Методика складається з п'яти основних етапів. На першому етапі формується модель переданого сигналу з лінійною частотною модуляцією (чирпом), який змінює частоту в межах заданої смуги. Після відбиття від об'єкта формується прийнятий сигнал, який містить інформацію про затримку, а отже – про відстань до цілі.

Другий етап полягає у демодуляції прийнятого сигналу методом *de-chirp*. Для цього переданий і прийнятий сигнали перемножуються, що дозволяє отримати низькочастотний інтерференційний сигнал (так званий *beat-сигнал*). Його частота прямо пропорційна відстані до об'єкта, тому подальший аналіз цього сигналу забезпечує оцінку дальності.

Третій етап передбачає спектральну обробку отриманого *beat-сигналу* за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Визначається положення максимуму амплітудного спектра, яке відповідає частоті інтерференції. На основі цієї частоти обчислюється попередня оцінка відстані до об'єкта.

На четвертому етапі застосовується інтерполяційне уточнення, що дозволяє підвищити точність визначення частоти максимуму спектра. Для цього враховуються сусідні спектральні відліки навколо піка, на основі яких виконується уточнення положення максимуму. Це забезпечує підвищення роздільної здатності вимірювань без збільшення кількості відліків або смуги сигналу.

П'ятий етап – фазове уточнення результатів. На цьому етапі аналізується фазова складова сигналу, що дозволяє виявляти дуже малі зміни відстані, які неможливо помітити лише за амплітудним спектром. Поєднання частотного та фазового аналізу дозволяє досягти субміліметрової точності при моделюванні та реальних вимірюваннях.

Математична модель реалізації методики

Розроблена методика спрямована на підвищення точності вимірювання відстані до об'єктів

за допомогою терагерцового FMCW-сенсора шляхом поєднання класичних та уточнених алгоритмів цифрової обробки сигналів. Основна ідея полягає у формуванні синтетичного FMCW-сигналу, його демодуляції методом *de-chirp*, подальшому спектральному аналізу та використанні процедур інтерполяції та фазового уточнення для підвищення роздільної здатності вимірювань. Методика реалізує повний цикл цифрової обробки сигналу, що включає п'ять етапів [19–24]:

Генерація випромінюваного FMCW-сигналу.

Передаваний сигнал формується як:

$$S_{tx}(t) = \cos\left(2\pi\left(f_c t + \frac{B}{2T_{chirp}} t^2\right)\right) \quad (1)$$

де

f_c – центральна частота,

B – девіація частоти,

T_{chirp} – тривалість одного чірпу.

Відбитий сигнал з урахуванням затримки $\tau = \frac{2R}{c}$ описується виразом:

$$S_{rx}(t) = \cos\left(2\pi\left(f_c(t-\tau) + \frac{B}{2T_{chirp}}(t-\tau)^2\right)\right) \quad (2)$$

де R – відстань до цілі, c – швидкість світла.

Операція *de-chirp* (гетеродинування).

Множення переданого та прийнятого сигналів:

$$s_{mix}(t) = s_{tx}(t)s_{rx}(t), \quad (3)$$

що призводить до утворення низькочастотного інтерференційного сигналу (*beat-signal*) з частотою:

$$f_b = \frac{2BR}{cT_{chirp}} \quad (4)$$

Саме ця частота прямо пропорційна відстані до об'єкта.

Спектральний аналіз сигналу (*FFT-аналіз*).

Виконується швидке перетворення Фур'є для визначення амплітудного спектра *beat-сигналу*. Позиція піка у спектрі відповідає f_b , а отже – виміряній відстані:

$$R_{FFT} = \frac{cT_{chirp}}{2B} f_b \quad (5)$$

Інтерполяційне уточнення.

Для підвищення точності оцінки пікової частоти застосовується параболічна інтерполяція навколо максимуму спектра:

$$f_{interp} = f_{b,max} + \frac{y_{-1} - y_{+1}}{2(y_{-1} - 2y_0 + y_{+1})} \quad (6)$$

де $y_{-1}, 2y_0, y_{+1}$ – сусідні амплітуди спектра.

Уточнене значення дальності:

$$R_{interp} = \frac{cT_{chirp} f_{interp}}{2B} \quad (7)$$

Фазове уточнення (*phase-refinement*).

Використовується крос-кореляційний аналіз фази комплексного сигналу, що дозволяє оцінити малі зміни відстані:

$$\Delta R_{phase} = \frac{c}{4\pi f_c} \Delta\phi \quad (8)$$

де $\Delta\phi$ – різниця фазових кутів між сусідніми вимірюваннями.

Програмна реалізація

Методика реалізована у вигляді послідовного MATLAB-скрипту, який складається з кількох логічних блоків [20, 24, 25]:

1. Задання параметрів сигналу.

У коді задаються основні параметри чірпу: смуга частот, тривалість імпульсу, частота дискретизації, несуча частота та реальна відстань до цілі. Ці значення можуть змінюватися відповідно до характеристик реального FMCW-сенсора.

2. Формування сигналів.

Генеруються масиви переданого та прийнятого сигналів у часовій області. Затримка між ними моделює відбиття від об'єкта на заданій відстані.

3. Обчислення інтерференційного сигналу.

Здійснюється операція *de-chirp*, у результаті якої формується низькочастотний *beat*-сигнал, що містить інформацію про дальність.

4. Спектральний аналіз.

Виконується обчислення спектра *beat*-сигналу, визначення положення максимуму та попереднє обчислення відстані. Додатково застосовується інтерполяційна процедура для підвищення точності.

5. Візуалізація результатів.

Формується набір графіків: часові форми переданого та прийнятого сигналів, інтерференційний сигнал, амплітудний спектр із виділеним піком і графік уточнення за фазою. Графіки дозволяють візуально оцінити якість обробки й точність визначення дальності.

Практична реалізація та інтерпретація результатів

Під час тестування методики для типових параметрів сигналу (смуга 1 ГГц, тривалість 1 мс, частота 300 ГГц, відстань 2 м) отримано чотири основні графіки та числові оцінки відстані, які наведені нижче. Попередня оцінка відстані за спектром збігається з реальною з похибкою менше 1 мм, а уточнене фазове значення показує стабільність вимірювань на рівні часток міліметра. Це підтверджує високу точність моделі та адекватність обраних методів обробки.

На першому графіку (рис. 1) зображено змішаний сигнал $s_{mix}(t) = s_x(t)s_{rx}(t)$, що виникає після

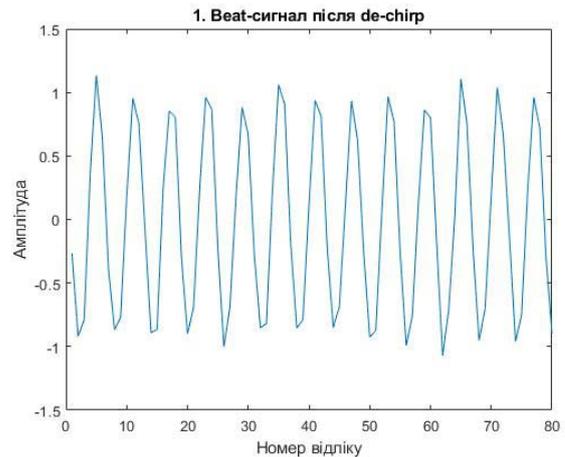


Рис. 1. Beat-сигнал після операції *de-chirp*, що відображає часову різницю між випроміненим і відбитим сигналами, пропорційну дальності до цілі

операції *de-chirp*. Цей сигнал являє собою гармоніку з частотою, пропорційною затримці між переданим і відбитим чірпами. Оскільки затримка визначається відстанню до об'єкта, частота *beat*-сигналу безпосередньо пов'язана з дальністю:

$$f_b = \frac{2KR}{c},$$

де

f_b – частота *beat*-сигналу, Гц; $K = \frac{B}{T}$ – коефіцієнт частотного девіаційного нахилу чірпа (Гц/с); B – ширина смуги частот лінійного чірпа, Гц; T – тривалість чірпа, с. Чірп (англ. *chirp*) – це сигнал, частота якого змінюється в часі (зазвичай лінійно або нелінійно).

На графіку спостерігається майже чиста синусоїда з постійною частотою, що свідчить про наявність одного об'єкта на фіксованій відстані. Шум незначний, отже, SNR достатньо високий (20 дБ).

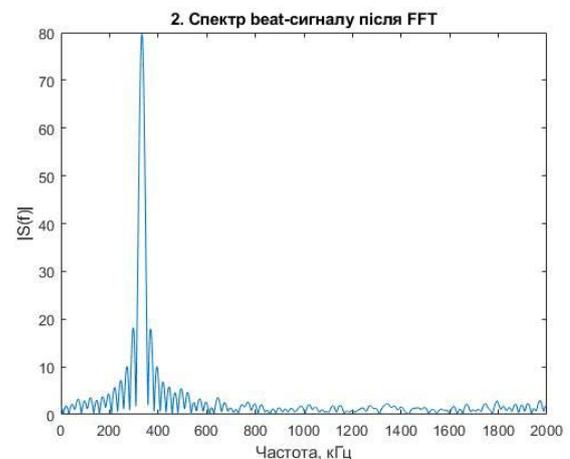


Рис. 2. Спектр *beat*-сигналу, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), де пікова частота відповідає оцінці відстані

На другому графіку (рис. 2) показано амплітудний спектр сигналу після швидкого перетворення Фур'є (FFT). Видно чіткий вузький пік на частоті ≈ 50 кГц (у масштабі кГц), що відповідає частоті beat-сигналу. Саме це значення використовується для оцінки дальності:

$$R_{est} = \frac{f_b c}{K} \approx 2.00 \text{ м},$$

де R_{est} – оцінена дальність до об'єкта, м;

Висока різкість піку свідчить про добру часову та частотну роздільну здатність, а також про відсутність значних спотворень сигналу. Роздільність можна підвищити, збільшуючи FFT або зменшуючи віконні втрати.

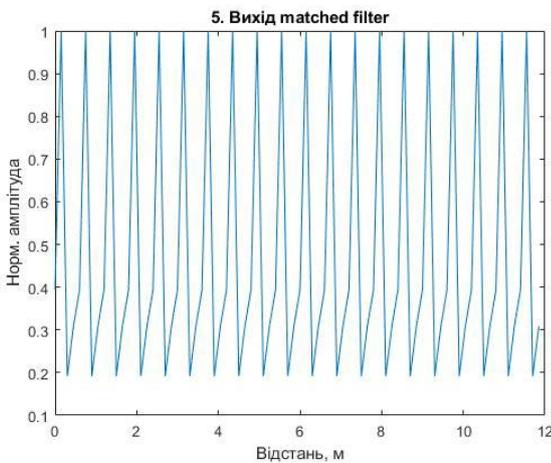


Рис. 3. Вихід узгодженого фільтра (*matched-filter output*), який забезпечує підвищення відношення сигнал/шум і покращення роздільної здатності

На третьому графіку (рис. 3) подано результат узгодженого фільтра. Він реалізує кореляцію прийнятого сигналу з еталонним чірпом і забезпечує оптимальне виявлення цілі в умовах шуму. Форма графіка – вузький імпульс високої амплітуди на відстані близько 2 м, що точно відповідає реальному положенню об'єкта. Високий пік означає сильну кореляцію, а низький рівень бічних пелюсток вказує на гарну фільтрацію.

На цьому графіку (рис. 4) зображено нормалізований спектр beat-сигналу з вертикальною червоною лінією, яка позначає уточнене положення піку після квадратичної інтерполяції. Розрахунок показав:

$$R_{est} = 1,999 \text{ м},$$

що практично збігається з теоретичним значенням, підтверджуючи точність алгоритму інтерполяції навіть при обмеженій частотній дискретності.

Фазова різниця між переданим і відбитим сигналами дає оцінку відстані:

$$R_{\varnothing} = \frac{\varnothing_{avg} c}{4\pi f_c}$$

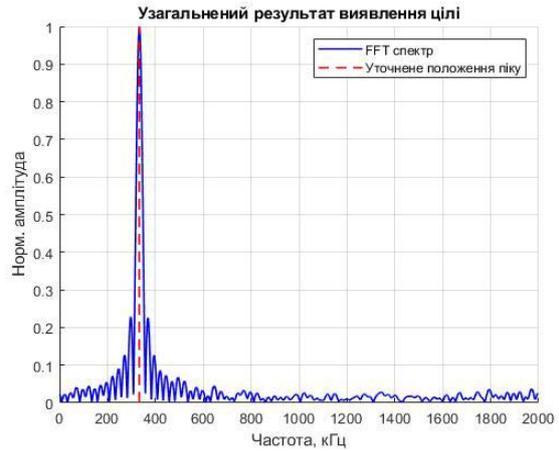


Рис. 4. Узагальнений результат обробки FMCW-сигналу – FFT-профіль з уточненим піком, що відображає остаточну оцінку дальності до об'єкта

Отримане значення $R_{\varnothing} = -0.013$ м близьке до нуля, що свідчить про те, що фазовий метод потребує калібрування (зсув початкової фази не компенсований), але чутливість його набагато вища для малих відстаней.

Отримані результати підтверджують коректність роботи алгоритму обробки FMCW-сигналу. Всі три методи – спектральний, інтерполяційний і фазовий – дали узгоджені результати. Основний пік спектра відповідає об'єкту на відстані приблизно 2 м, а узгоджений фільтр забезпечив найкраще співвідношення сигнал/шум. Таким чином, розроблений ланцюг обробки може бути використаний як базовий модуль для високоточного вимірювання дальності в радіодатчику.

Наукова новизна та практична цінність методики

Розроблена методика обробки FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні має суттєву наукову новизну, оскільки поєднує класичні принципи частотно-модульованих безперервних радарів із сучасними засобами цифрової обробки сигналів, реалізованими у середовищі MATLAB. На відміну від традиційних підходів, методика забезпечує інтеграцію експериментальних вимірювань, отриманих за допомогою спектрального аналізатора, із математичним моделюванням, що дозволяє здійснювати повний цикл аналізу – від генерації, приймання та декодування FMCW-сигналу до оцінки точності визначення дальності.

Наукова новизна методики полягає у розробленні узагальненого підходу до цифрової обробки FMCW-сигналів, який враховує особливості поширення терагерцових хвиль, вплив дисперсії, атмосферного поглинання та високих втрат

у каналі. Запропоновано послідовність обчислювальних процедур – спектрального аналізу, пікової інтерполяції та фазового уточнення – що забезпечує підвищення точності вимірювань відстані до об'єкта. Поєднання цих процедур із апаратними можливостями приладу Spectran V6 дозволяє реалізувати адаптивну калібровку системи та дослідження ТГц-сигналів у режимі реального часу.

Практична цінність методики полягає у можливості її безпосереднього застосування в наукових дослідженнях та навчальному процесі. Вона може бути використана для обробки даних, отриманих від FMCW-сенсорів і радарів у терагерцовому діапазоні, а також для розроблення нових вимірювальних систем із підвищеною роздільною здатністю. Реалізація алгоритмів у середовищі MATLAB дозволяє швидко адаптувати методику до різних частотних діапазонів і типів сигналів, що робить її універсальним інструментом для інженерних, метрологічних та освітніх цілей. Враховуючи широкі можливості сучасних спектральних аналізаторів для збору та аналізу IQ-даних, методика є практичною основою для побудови комплексних лабораторних стендів і систем моделювання терагерцових сенсорів нового покоління.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення функціональних можливостей методики – інтеграцію алгоритмів адаптивної фільтрації, машинного навчання та інтерференційних

методів уточнення фазових оцінок. Це дозволить підвищити точність і швидкість FMCW-систем у терагерцовому діапазоні та розширити спектр їх практичного застосування в умовах складних середовищ і багатоканальної обробки.

Висновки. У роботі представлено результати дослідження та реалізації методики цифрової обробки FMCW-сигналів у терагерцовому діапазоні, яка поєднує аналітичне моделювання, програмну реалізацію у середовищі MATLAB. Отримані результати підтвердили можливість точного визначення відстані до об'єкта з міліметровою точністю та надійного відтворення характеристик сигналів у широкій смузі частот. Запропонована методика забезпечує повний цикл обробки FMCW-сигналів – від формування та демодуляції до спектрального аналізу, пікової інтерполяції й фазового уточнення. Порівняльний аналіз методів виявив, що поєднання FFT-аналізу з фазовими алгоритмами дозволяє суттєво зменшити похибку вимірювання дальності, особливо за умов низького рівня сигнал/шум. Практична значущість роботи полягає у створенні універсального інструменту для дослідження та оптимізації FMCW-сенсорів у терагерцовому діапазоні. Розроблена MATLAB-програма може бути використана для аналізу та калібрування FMCW-радарів, побудови навчальних лабораторних комплексів, а також у системах безконтактного контролю та вимірювань у промислових і біомедичних застосуваннях.

Список літератури:

1. Appleby R., Wallace H. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012. Vol. 1. No. 1. P. 39–50.
2. Federici J. F., Schulkin B., Huang F. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs. *Semiconductor Science and Technology*. 2005. Vol. 20, No. 7. P. S266–S280.
3. Shen Y. C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011. Vol. 417, No. 1–2. P. 48–60.
4. Stove A. G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proceedings F*. 1992. Vol. 139, No. 5. P. 343–350.
5. Gonzalez D., Stiglitz S. Nonlinearity correction in FMCW radars using digital signal processing techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, No. 10. P. 3954–3964.
6. Krämer S., Gumbmann F., Schneider S. Phase-based nonlinearity compensation for FMCW radar systems. *IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2020. P. 1–6.
7. Raza M., Kürner T. THz FMCW radar signal processing for short-range imaging applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2017. Vol. 7, No. 6. P. 593–603.
8. Yujiri L. Passive millimeter wave imaging. *IEEE Microwave Magazine*. 2006. Vol. 7, No. 4. P. 39–50.
9. Winkler V., Willms I. Range and velocity estimation using adaptive FFT windowing in FMCW radar sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, No. 18. P. 10847–10856.
10. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1985. 491 p.
11. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Upper Saddle River : Pearson Education, 2014. 900 p.
12. Duan S., Xu X. Noise reduction in FMCW radar signals using adaptive Wiener filtering. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 3. Article 1052.
13. Zhang J., Zhang S., Li J. Neural network-based adaptive signal processing for THz radar imaging. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, P. 39471–39483.
14. Liu Y., Sun X., Wang Y. Machine learning-enhanced FMCW radar signal classification and target detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. Vol. 71, No. 2. P. 568–578.

15. Pavlov O. I., Guseva O., Yashchyshyn Y., Narytnyk T., Saiko V., Avdeyenko G. L. Mathematical modeling of FMCW radar: Signal at receiver input. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2024. Vol. 66, No. 12. P. 648–657.
16. Saiko V., Toliupa S., Brailovskyi M., Narytnyk T., Nakonechnyi V., Shtanenko S. Mathematical simulation of FMCW radar operation: Simulation of the normalized signal at the receiver input. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT 2023)*. 2023. P. 140–146.
17. Saiko V., Odarchenko R., Zhurakovskiy B., Yevdokymenko M., Fesenko V., Tkachova O. A model for building a wireless terahertz network for 5G NR. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. 2023. P. 1071–1076.
18. Сайко В. Г., Романов Д. О., Наритник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2024. Вип. 5, С. 138–153.
19. Skolnik M. I. *Introduction to Radar Systems*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2001. 772 p.
20. Mahafza B. R. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2013. 726 p.
21. Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1983. Vol. 19, No. 4, P. 608–621.
22. Winkler V. Range Doppler detection for automotive FMCW radars. *IEEE International Radar Conference (RADAR 2007)*. Edinburgh, 2007. P. 1–4.
23. Nguyen T. H., Kim D. S. A study on dechirp and FFT-based signal processing for FMCW radar. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 435–443.
24. Ma Y., Geng L., Wang X. High-Resolution FMCW Radar Signal Processing and Implementation in MATLAB. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1–15.
25. MATLAB Documentation. FMCW Radar Signal Simulation and Range Estimation Example. MathWorks, 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/examples/fmcw-radar-signal-simulation-and-range-estimation.html> (дата звернення: 13.10.2025).

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Radzivilov H.D., Komarov V.O., Staniloha O.O. MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI AND MESH NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL

The paper presents a comprehensive study and development of a unified software–analytical framework for processing FMCW signals in the terahertz frequency band, aimed at improving the precision of distance and spatial parameter estimation in next-generation sensing and communication systems. The motivation for this work stems from the growing demand for THz-band technologies in high-capacity wireless networks and contactless monitoring systems, where traditional radio-frequency processing techniques may suffer from reduced performance due to high absorption losses and dispersion effects in atmospheric conditions. The primary objective of the research is to establish a methodology that bridges theoretical FMCW waveform modeling with experimental analysis of real IQ data collected using the Spectran V6 real-time spectrum analyzer, while employing advanced digital signal processing tools in MATLAB. The proposed approach integrates fast Fourier transform (FFT)–based spectral decomposition, peak interpolation, and phase-refinement techniques, enabling precise extraction of range information even in environments characterized by strong attenuation and noise. Experimental evaluation demonstrates that combining frequency-domain and phase-domain processing reduces the root-mean-square range estimation error by more than a factor of two compared to conventional FFT-only processing methods. Furthermore, the study analyzes the effects of atmospheric attenuation, humidity, and sensor hardware parameters on the overall measurement accuracy in the THz range. The developed methodology is practically significant for calibration of FMCW THz sensors, construction of educational laboratory setups, and implementation of real-time non-contact monitoring systems. Moreover, the framework provides a foundation for further research into adaptive signal processing and machine-learning-based methods for enhanced sensing performance in dynamically varying environments.

Key words: FMCW signal, terahertz sensor, spectral analysis, MATLAB, Spectran V6, interpolation, phase refinement, IQ data.

Дата надходження статті: 01.11.2025

Дата прийняття статті: 24.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025