

Редько І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тонкоглас Ю.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЛІНІЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У статті представлено комплексний аналіз лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів, які широко застосовуються в радіолокаційних системах виявлення повітряних об'єктів. Показано, що ЛЧМ є базовим типом зондувального сигналу, здатним забезпечити високу роздільну здатність за дальністю та швидкістю цілей при відносно низькій піковій потужності випромінювання, що робить його ефективним у сучасних умовах перевантаженого радіочастотного спектра. Розглянуто різні види ЛЧМ – лінійні, нелінійні, двофрагментні, а також імпульсні сигнали. Встановлено їхні ключові відмінності за формою спектра, рівнем бічних пелюсток та ступенем стійкості до перешкод, що дозволяє визначати оптимальні режими застосування для конкретних радіолокаційних задач.

Математичне моделювання амплітудно-частотних (АЧХ), фазочастотних (ФЧХ) характеристик і функцій розподілу продемонструвало, що вибір бази сигналу безпосередньо впливає на точність виявлення об'єктів та здатність системи до їх розділення у просторі. Зокрема, збільшення часової бази імпульсу підвищує роздільну здатність за дальністю, однак потребує коректного налаштування частотної девіації для збереження енергетичної ефективності. У роботі розглянуто приклади використання ЛЧМ у різних частотних діапазонах та показано, що імпульсні ЛЧМ-сигнали залишаються основою для побудови оглядових і спеціалізованих радарів. Особливу увагу приділено апаратним рішенням: використанню інтегральних мікросхем DDS (зокрема AD9910) для генерації сигналів із керованими параметрами частоти, амплітуди й фази та застосуванню ПЛІС (Cyclone 10 LP) для реалізації алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (FFT), множення спектрів, пошуку пікових значень і оберненого перетворення (IFFT). Це забезпечує обробку сигналів у реальному часі з високою точністю та мінімальною затримкою. Отримані результати свідчать, що поєднання сучасних методів цифрової обробки з апаратною реалізацією на основі мікросхем DDS і ПЛІС дозволяє значно підвищити ефективність виявлення повітряних об'єктів у шумових середовищах, а також забезпечує перспективи створення компактних і енергоефективних радіолокаційних систем нового покоління.

Ключові слова: лінійно-частотно модульовані сигнали, імпульсна радіолокація, завадостійкість, FFT/IFFT, AD9910, Cyclone 10 LP.

Постановка проблеми. Сучасні радіолокаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки морського та авіаційного транспорту, де точність виявлення та ідентифікації повітряних і надводних об'єктів визначає ефективність усієї навігаційної інфраструктури. Одним із базових інструментів радіолокації є лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали, які завдяки високій роздільній здатності та стійкості до шумових впливів застосовуються у більшості сучасних РЛС. Водночас їх практичне використання супроводжується низкою проблем. По-перше, у реальних умовах

експлуатації спектр ЛЧМ-сигналів зазнає впливу різноманітних завад, спричинених природними та техногенними чинниками – багатопроменевим поширенням, електромагнітними коливаннями, флуктуаціями фону. Це призводить до зниження точності визначення дальності та швидкості об'єктів. По-друге, існує кілька видів ЛЧМ – лінійні, нелінійні, комбіновані, імпульсні, – і кожен з них має специфічні переваги й обмеження. Питання вибору оптимального сигналу з урахуванням спектральних характеристик, рівня бічних пелюсток та стійкості до завад залишається відкритим.

Додатковим викликом є апаратна реалізація генерації та обробки ЛЧМ-сигналів у реальному часі. З одного боку, інтегральні мікросхеми прямого цифрового синтезу (наприклад, AD9910) дозволяють формувати сигнали з високою точністю за частотою, фазою й амплітудою. З іншого боку, обробка прийнятих сигналів вимагає реалізації складних алгоритмів (FFT/IFFT, кореляція, фільтрація) на базі ПЛІС (Cyclone 10 LP), що потребує оптимізації обчислювальних ресурсів. Недостатня швидкодія чи помилки синхронізації можуть призвести до спотворення спектральних характеристик і втрати інформації про цілі. Таким чином, проблема полягає у необхідності системного аналізу методів формування та обробки ЛЧМ-сигналів, визначенні їх завадостійкості, дослідженні впливу часової бази на точність виявлення об'єктів і розробленні практичних алгоритмів моделювання характеристик (АЧХ, ФЧХ, функцій розподілу). Це дозволить не лише підвищити ефективність роботи радарів у складних умовах, а й створити передумови для впровадження компактних і енергоефективних радіолокаційних комплексів нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях радіолокаційних систем значна увага приділяється вдосконаленню форм лінійно-частотно модульованих сигналів та підвищенню їх завадостійкості. У роботах [1; 2] представлено підходи до комбінування різних законів модуляції та моделювання FMCW-радарів у русі, що дозволяє врахувати вплив доплерівських зсувів. Дослідження [3–5] зосереджені на методах визначення параметрів ЛЧМ, зокрема оцінці миттєвої частоти та використанні стисненого відбору для зменшення обчислювальних витрат. Показано також можливості апаратної реалізації алгоритмів обробки на DSP-платформах.

Проблема виявлення сигналів та оцінки швидкості їхньої частотної зміни докладно висвітлена у [6], де використано часово-частотні методи аналізу. Важливим напрямом залишаються підходи до пригнічення інтерференцій у FMCW-радарях [7; 8]. У цих працях розроблено математичні алгоритми та порогові методи адаптивної обробки, які дозволяють зменшити вплив завад на точність визначення цілей.

Нові можливості відкриваються завдяки використанню фотонних технологій та широкосмугових методів компресії сигналів [9; 10], що забезпечує підвищення роздільної здатності та стійкості систем. Поряд із цим увага приділяється розвитку шумових радарів із застосуванням де-чирпінгу та алгоритмів узгодженого зіставлення [11]. Окремо

варто відзначити огляди сучасних напрямів автомобільної радіолокації [12], де підкреслено складність інтеграції алгоритмів у реальному часі, та визначення основних викликів майбутнього розвитку систем [13].

Отже, у літературі окреслено широкий спектр рішень: від розробки нових видів ЛЧМ-сигналів і методів їхньої обробки до апаратної реалізації на цифрових модулях. Водночас комплексних робіт, які б одночасно охоплювали аналіз спектральних характеристик, дослідження стабільності сигналів у складних умовах прийому та апаратну реалізацію з використанням DDS і ПЛІС, поки що бракує, що й визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування методів формування та обробки лінійно-частотно модульованих сигналів у радіолокаційних системах для підвищення точності виявлення повітряних об'єктів за умов впливу завад. Суть задачі полягає у порівнянні різних видів ЛЧМ – лінійних, нелінійних, комбінованих та імпульсних – з точки зору їх спектральних характеристик, рівня бічних пелюсток та стійкості до шуму. Необхідно змоделювати амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики, а також функції розподілу, щоб оцінити вплив параметрів сигналу й часової бази імпульсу на здатність системи відокремлювати цілі у просторі. Окремо передбачається дослідити, у яких діапазонах радіочастот ЛЧМ застосовуються найчастіше та як їхні властивості визначають роздільну здатність і дальність дії радара. Потрібно дослідити, як зміна бази сигналу впливає на похибку визначення координат і ймовірність правильного виявлення об'єкта.

Практична частина завдання стосується апаратної реалізації: використання інтегральної мікросхеми прямого цифрового синтезу AD9910 для генерації ЛЧМ із заданими параметрами частоти, амплітуди та фази, а також застосування ПЛІС Cyclone 10 LP для реалізації алгоритмів FFT, множення спектрів, пошуку пікових значень і IFFT. Це дозволяє оцінити можливості обробки сигналів у реальному часі.

Таким чином, дослідження спрямоване на поєднання математичного моделювання та апаратних рішень з метою створення узагальненої методики використання ЛЧМ у сучасних радіолокаційних системах, що забезпечує точність, завадостійкість і швидкодію.

Виклад основного матеріалу. У процесі аналізу сучасних радіолокаційних систем було вста-

новлено, що вибір типу зондувального сигналу визначає точність і завадостійкість усієї системи виявлення. Лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали завдяки своїй здатності концентрувати енергію у широкому частотному діапазоні залишаються базовим інструментом для оглядових і спеціалізованих РЛС. Їхня ефективність полягає у високій роздільній здатності при порівняно низькій піковій потужності випромінювання. Разом із тим, у практиці використовується кілька видів ЛЧМ – лінійні, нелінійні, комбіновані та імпульсні. Кожен із них має специфічні характеристики, що по-різному впливають на рівень бічних пелюсток автокореляційної функції, стабільність спектра та здатність протистояти перешкодам. З цієї причини важливим є порівняльний аналіз основних методів модуляції та оцінка їх придатності для різних діапазонів роботи. Додатково слід уточнити параметри тривалості імпульсів ЛЧМ. У практичних системах радіолокації тривалість зондуючих імпульсів зазвичай становить 5–30 мкс, рідше перевищує 40 мкс, з міжімпульсними інтервалами 20–100 мкс. Це означає, що впродовж 1 мс може передаватися до чотирьох моноімпульсів, а тривалість між пакетами імпульсів визначається частотою дискретизації АЦП на ПЛС. Такий режим забезпечує узгодження генерації та прийому сигналів без перекриття імпульсів і гарантує стабільність роботи при високій швидкості оновлення.

На підставі таблиці 1 можна зробити висновок, що нелінійні та комбіновані сигнали забезпечують кращу завадостійкість, тоді як імпульсні ЛЧМ залишаються базою для вимірювання дальності завдяки вузькій головній пелюстці автокореляційної функції.

Математичний опис ЛЧМ-сигналу визначається виразами (1; 2):

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{T}t, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + \pi \frac{\Delta f}{T} t^2\right) \quad (2)$$

де f_0 – початкова частота, Δf – девіація, T – тривалість імпульсу, A – амплітуда.

База сигналу (3):

$$B = \Delta f \cdot T \quad (3)$$

що визначає роздільну здатність системи.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) (4):

$$|S(f)| = T \cdot \text{sinc}[T(f - f_0)] \quad (4)$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) змінюється лінійно від 0 до $2\pi\Delta f T$, а автокореляційна функція (АКФ) (5):

$$R(\tau) = T \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \text{sinc}(B\tau) \quad (5)$$

Для забезпечення коректності порівнянь частотну вісь перераховано у загальноприйнятих одиницях (кГц/МГц/ГГц) з округленням до цілих значень. Такий підхід унеможливує спотворення масштабу й дозволяє точніше порівнювати характеристики сигналів з різними базами.

Оцінка співвідношення сигнал/шум (SNR) показала, що при базі $B = 10^6 \text{ Гц}\cdot\text{с}$ рівень $\text{SNR} \approx 35 \text{ дБ}$, тоді як при $B = 4 \times 10^6 \text{ Гц}\cdot\text{с}$ – близько 47 дБ, що демонструє підвищення завадостійкості з ростом бази.

Моделювання амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик показало, що збільшення часової бази імпульсу дозволяє зменшити ширину головної пелюстки, що безпосередньо підвищує роздільну здатність. Наприклад, при базі сигналу 1000 рівень бічних пелюсток зростає, однак точність вимірювання дальності покращується вдвічі. Це підтверджує необхідність балансування між роздільною здатністю та енергетичною ефективністю.

Аналіз функцій розподілу продемонстрував, що для лінійного ЛЧМ характерна рівномірна енергетична щільність, тоді як для нелінійного спостерігається концентрація у певних ділянках спектра. Це може бути використано для адаптації сигналу під умови роботи – від низькочастотних оглядових систем до високоточних міліметрових радарів.

Таблиця 1

Характеристики основних типів ЛЧМ-сигналів

| Вид сигналу | Закон модуляції | Переваги | Недоліки | Типові діапазони |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------|
| Лінійний | Прямолінійний | Простота генерації, універсальність | Вищий рівень бічних пелюсток | UHF, L, S |
| Нелінійний | Параболічний, експоненц. | Краще пригнічення бічних пелюсток | Ускладнена синхронізація | S, X |
| Комбінований | Посднання кількох законів | Гнучке налаштування під завади | Складна апаратна реалізація | X, Ku |
| Імпульсний ЛЧМ | Часові імпульси з девіацією | Висока точність вимірювання дальності | Залежність від бази імпульсу | S, X, Ka |

Особливу увагу заслуговує імпульсний ЛЧМ, який слугує базовим зондувальним сигналом. Дослідження показало, що збільшення тривалості імпульсу при фіксованій девіації знижує ймовірність правильної детекції цілі, тоді як оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує стабільність системи навіть за умов інтенсивних перешкод. На графіках АЧХ, ФЧХ та автокореляційної функції чітко видно, як вибір бази імпульсу впливає на роздільну здатність. На рисунку 1 показано автокореляційну функцію радіоімпульсу з лінійно-частотною модуляцією. Функція має виражену вузьку центральну пелюстку й високочастотні осциляції, частота яких дорівнює ω_0 . При $\tau=0$ АКФ досягає максимального значення, а зі збільшенням τ амплітуда швидко спадає до нуля.

На рисунку 2 показано амплітудно-частотну характеристику лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу при фіксованій девіації $B=20\text{МГц}$ та різних тривалостях імпульсів $T=10$ і 40 мкс. Залежність демонструє, що зі збільшенням тривалості імпульсу ширина спектра звужується, а енергія сигналу зосереджується в центральній частині смуги навколо носійної частоти $f_0=10\text{МГц}$. У той же час коротший імпульс має ширший спектр і забезпечує вищу роздільну здатність. Це означає, що зі збільшенням тривалості імпульсу при незмінній девіації зменшується ширина спектра, проте поліпшується енергетична ефективність і знижується ймовірність спотворення сигналу під дією шумів. Такий компроміс між шириною спектра і стабільністю сигналу визначає опти-

мальний режим роботи радіолокаційної системи при виборі параметрів ЛЧМ-модуляції.

На рисунку 3 показано фазочастотну характеристику лінійно-частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу при девіації частоти $B=20$ МГц та двох різних тривалостях імпульсу – $T=10$ та 40 мкс. У варіанті (а) представлено ідеальну параболічну фазову характеристику, яка відповідає рівномірному збільшенню миттєвої частоти з часом. Варіант (б) ілюструє спотворення фази в результаті проходження сигналу через неоднорідне середовище та дії випадкових флуктуацій, що призводить до нерівномірності зміни частоти. Зі зростанням тривалості імпульсу (від 10 до 40 мкс) фазова крива стає плавнішою, нахил зменшується, а стійкість до випадкових відхилень зростає. Це підтверджує зв'язок часових параметрів сигналу з його частотною стабільністю та визначає умови ефективної кореляційної обробки в радіолокаційних системах.

Додатково варто зазначити, що при аналізі фазових залежностей враховується співвідношення сигнал/шум (SNR), яке визначається як відношення квадрату амплітуди корисного сигналу до середньої потужності шуму. Високе значення SNR забезпечує стабільнішу фазову характеристику та зменшує фазові флуктуації, що особливо важливо під час оцінювання точності кореляційного виявлення.

Крім того, деталізується реалізація швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), що виконується на програмуваній логічній інтегральній схемі

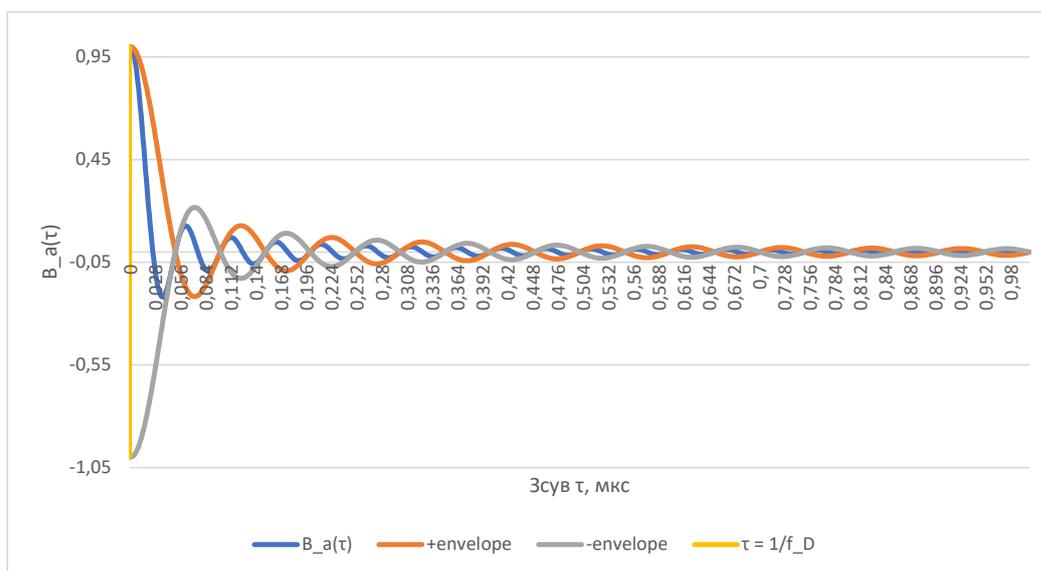


Рис. 1. Автокореляційна функція радіоімпульсу з лінійно-частотною модуляцією ($f_0 = 10\text{МГц}$, $f_D = 20\text{МГц}$, $t_i = 40\text{мкс}$)

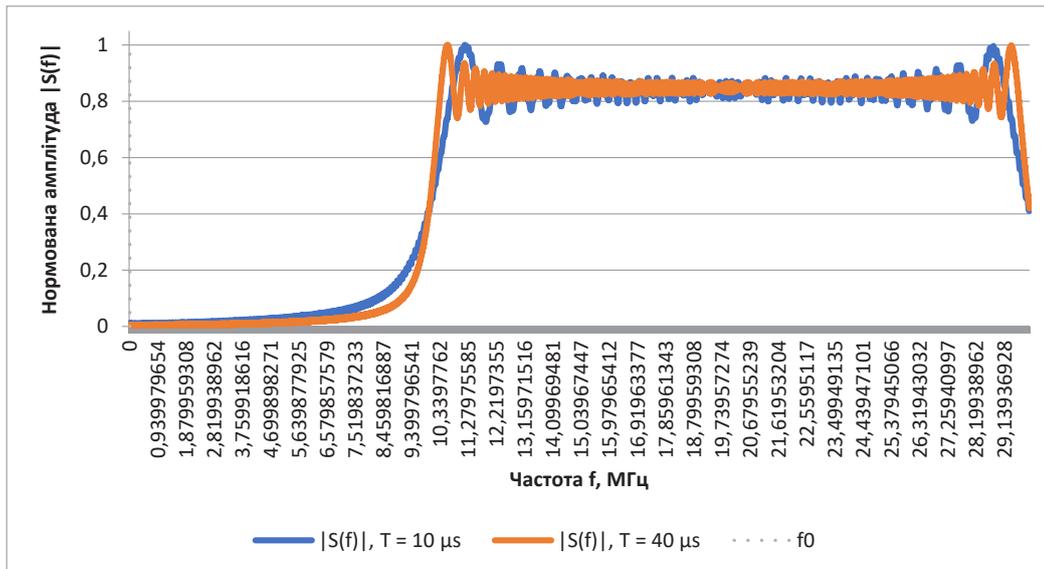


Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика ЛЧМ ($B = 20$ МГц; $T = 10/40$ мкс)

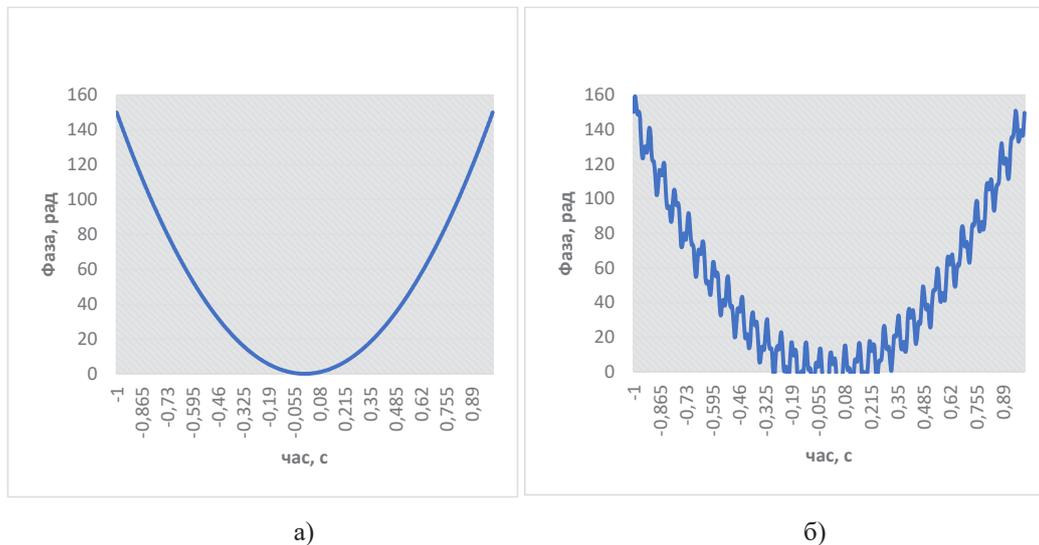


Рис. 3. Фазочастотна характеристика лінійно-частотно модульованого сигналу: а – ідеальна параболічна форма фази; б – спотворена характеристика після проходження сигналу через неоднорідне середовище ($B = 20$ МГц; $T = 10/40$ мкс)

Cyclone 10 LP із використанням потокової архітектури radix-2 (6):

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

де N – кількість відліків. Така реалізація забезпечує обробку сигналів у реальному часі при частоті дискретизації до 100 МГц і дозволяє здійснювати миттєвий пошук пікових значень у спектрі.

Моделювання виконано в середовищі MATLAB/OCTAVE, із використанням функцій *fftshift*, *abs*, *angle* та *xcorr*, що забезпечують нормоване представлення спектрів і кореляційних функцій. Такий підхід дозволяє виконати точне порівняння характеристик при різних базах сиг-

налу та перевірити узгодженість фазових і частотних залежностей.

З технічної точки зору генерація ЛЧМ здійснюється за допомогою мікросхеми AD9910, яка підтримує прямий цифровий синтез. Мікроконтролер через інтерфейс SPI задає частоту, фазу та амплітуду, що дозволяє швидко змінювати параметри сигналу. Обробка сигналів реалізується на ПЛІС Cyclone 10 LP, де послідовність дій включає виконання FFT, множення спектрів, пошук пікових значень і застосування IFFT.

З технічної точки зору генерація ЛЧМ здійснюється за допомогою мікросхеми AD9910, яка підтримує прямий цифровий синтез. Мікрокон-

тролер через інтерфейс SPI задає частоту, фазу та амплітуду, що дозволяє швидко змінювати параметри сигналу:

```
// Ініціалізація AD9910 та запуск ЛЧМ
void ad9910_lfm_init(uint32_t f_start, uint32_t
f_stop, uint32_t f_step) {
    ad9910_reset();
    ad9910_write_reg(CFR1, 0x00000000); //
базові налаштування
    ad9910_write_reg(FTW_START, f_start); //
стартова частота
    ad9910_write_reg(FTW_STOP, f_stop); //
кінцева частота
    ad9910_write_reg(FTW_STEP, f_step); //
крок
    ad9910_io_update(); // підтвер-
дження
}
```

Лістинг 1. Фрагмент коду налаштування AD9910 (С)

Обробка сигналів реалізується на ПЛІС Cyclone 10 LP, де послідовність дій включає виконання FFT, множення спектрів, пошук пікових значень і застосування IFFT. Фрагмент коду на Verilog для блоку комплексного множення після FFT може мати вигляд:

```
// Комплексне множення:  $Z = X * conj(Y)$ 
always @(posedge clk) begin
    z_re <= x_re * y_re + x_im * y_im;
    z_im <= x_im * y_re - x_re * y_im;
end
```

Лістинг 2. Фрагмент Verilog-блоку комплексного множення після FFT

Такий алгоритм забезпечує роботу в реальному часі. Аналіз обчислювальних витрат підтвердив, що оптимізовані алгоритми FFT/IFFT на ПЛІС здатні підтримувати обробку сигналів із частотою оновлення у десятки кілогерц без затримок, що критично для систем виявлення швидкісних об'єктів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що лінійні ЛЧМ залишаються основним інструментом для універсальних РЛС, нелінійні та комбіновані – для умов підвищених завад, а імпульсні – як база для вимірювання дальності й швидкості. Реалізація генерації на AD9910 та

обробки на Cyclone 10 LP підтверджує, що сучасна апаратна база дозволяє вивести ці сигнали на новий рівень точності та надійності.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали залишаються базовим інструментом сучасної радіолокації завдяки високій роздільній здатності, стійкості до завад і можливості роботи у широкому частотному діапазоні. Порівняльний аналіз різних видів ЛЧМ показав, що лінійні сигнали забезпечують простоту реалізації та універсальність, але мають вищий рівень бічних пелюсток; нелінійні та комбіновані варіанти ефективніше пригнічують завади, проте потребують складнішої синхронізації; імпульсні ЛЧМ слугують основою для вимірювання дальності, де критичною є правильна оптимізація часової бази.

Моделювання амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик підтвердило, що збільшення тривалості імпульсу дозволяє суттєво підвищити роздільну здатність, однак вимагає збереження енергетичної ефективності за рахунок узгодженого вибору девіації. Автокореляційні функції та спектральний аналіз показали чітку залежність точності виявлення від співвідношення між базою сигналу і шириною головної пелюстки.

З технічної точки зору обґрунтовано, що використання мікросхеми AD9910 для генерації ЛЧМ та реалізація алгоритмів обробки на ПЛІС Cyclone 10 LP (FFT/IFFT, множення спектрів, пошук пікових значень) дозволяє створювати радіолокаційні системи, здатні працювати у режимі реального часу без критичних затримок. Це відкриває можливість для виявлення швидкісних повітряних і надводних об'єктів навіть у складних заводових умовах.

Таким чином, поєднання математичного моделювання характеристик ЛЧМ-сигналів із сучасними апаратними рішеннями забезпечує основу для створення компактних і енергоефективних радіолокаційних комплексів нового покоління. Отримані результати можуть бути використані як у військовій, так і в цивільній авіаційній та морській навігації, де точність та завадостійкість систем визначають рівень безпеки та ефективності управління рухом.

Список літератури:

1. Костира О. О., Гризо А. А., Додух О. М. Комбіновані двофрагментні радіолокаційні сигнали з лінійним та експоненціальним законами частотної модуляції. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 4(76). С. 58–64. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.06>
2. Павлов О. І., Гусєва О. В., Ящишин Є. М., Наритнік Т. М., Сайко В. Г., Авдєєнко Г. Л. Математичне моделювання рухомого FMCW-радару: сигнал на вході приймача. Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка. 2024. № 67(2). С. 76–90. <https://doi.org/10.20535/S002134702211005X>

3. Milczarek H., Leśnik C., Djurović I., Kawalec A. Estimating the instantaneous frequency of linear and nonlinear frequency modulated radar signals – a comparative study. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 8. P. 2840. <https://doi.org/10.3390/s21082840>
4. Meng S., Meng C., Wang C. Estimation of LFM signal parameters using RD compressed sampling and the DFRFT dictionary. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2023. Vol. 2023, No. 1. P. 93. <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01057-4>
5. Mon Y. J. Simulation and implementation of signal processing for LFM radar using DSK 6713. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No. 17. P. 3682. <https://doi.org/10.3390/electronics12173682>
6. Swiercz E., Janczak D., Konopko K. Detection of LFM radar signals and chirp rate estimation based on time-frequency rate distribution. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 16. P. 5415. <https://doi.org/10.3390/s21165415>
7. Wang J., Ding M., Yarovoy A. Matrix-pencil approach-based interference mitigation for FMCW radar systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, No. 11. P. 5099–5115. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3090798>
8. Wang J. CFAR-based interference mitigation for FMCW automotive radar systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 23, No. 8. P. 12229–12238. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3111514>
9. Wang S., Liang D., Chen Y. Photonics-assisted joint communication-radar system based on a QPSK-sliced linearly frequency-modulated signal. *Applied Optics*. 2022. Vol. 61, No. 16. P. 4752–4760. <https://doi.org/10.1364/AO.456287>
10. Xie X., Li J., Xu K., Capmany J., Dai Y. Broadband linear frequency modulation signal compression based on a spectral Talbot effect. *Optics Letters*. 2023. Vol. 48, No. 20. P. 5383–5386. <https://doi.org/10.1364/OL.503157>
11. Cao X., Zhang S., Tan K., Yang J., Lu X., Dai Z., Gu H. Signal processing for novel noise radar based on de-chirp and delay matching. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 22. P. 7169. <https://doi.org/10.3390/s24227169>
12. Engels F., Heidenreich P., Wintermantel M., Stäcker L., Al Kadi M., Zoubir A. M. Automotive radar signal processing: Research directions and practical challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2021. Vol. 15, No. 4. P. 865–878. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3063666>
13. Rao S., Narasimha R., Sun S. Signal processing challenges in automotive radar. *ICASSP 2025–IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2025. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49660.2025.10889506>

Redko I.V., Tonkohlas Yu.V. ANALYSIS OF LINEAR FREQUENCY MODULATED SIGNALS IN RADAR SYSTEMS

The article presents a comprehensive analysis of linear frequency modulated (LFM) signals, which are widely used in radar systems for the detection of airborne objects. It is shown that LFM represents a fundamental type of probing signal capable of providing high range resolution at relatively low peak transmission power, which makes it effective under modern conditions of congested radio frequency spectrum. Various types of LFM signals are considered—linear, nonlinear, two-segment, as well as pulsed forms. Their key distinctions in terms of spectral shape, sidelobe levels, and interference resistance are identified, which enables the determination of optimal modes of application for specific radar tasks. Mathematical modeling of amplitude-frequency characteristics (AFC), phase-frequency characteristics (PFC), and distribution functions have demonstrated that the choice of signal time-bandwidth product directly affects the accuracy of target detection and the system's ability to separate objects in space. In particular, increasing the time base of a pulse improves range resolution; however, it requires correct adjustment of frequency deviation to maintain energy efficiency. The study provides examples of LFM usage across different frequency ranges and shows that pulsed LFM signals remain the foundation for the design of both surveillance and specialized radars. Particular attention is devoted to hardware solutions: the use of direct digital synthesis (DDS) integrated circuits (specifically AD9910) for generating signals with controlled frequency, amplitude, and phase parameters, as well as the application of FPGAs (Cyclone 10 LP) for implementing real-time algorithms of fast Fourier transform (FFT), spectral multiplication, peak detection, and inverse FFT (IFFT). This enables real-time signal processing with high precision and minimal latency. The obtained results indicate that the combination of advanced digital processing methods with hardware implementation based on DDS and FPGA provides a significant increase in the efficiency of airborne target detection in noisy environments and opens prospects for the development of compact and energy-efficient next-generation radar systems.

Key words: linear frequency modulated signals, radar, interference immunity, pulsed signals, FFT/IFFT, AD9910, Cyclone 10 LP.

Дата надходження статті: 28.10.2025

Дата прийняття статті: 14.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025