

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

ВАСИЛЬЄВ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 537.86:621

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ
АВТОДИННОГО ВІДГУКУ В ЗАДАЧАХ БЛИЖНЬОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ**

01.04.03 - радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Єрмак Геннадій Павлович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук
України, м. Харків,
старший науковий співробітник відділу теорії дифракції
і дифракційної електроніки

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
Павліков Володимир Володимирович,
Харківський національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут», декан факультету радіотехнічних систем
літальних апаратів

Захист відбудеться «27» квітня 2018 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий «27» березня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Роботу присвячено розробці, вдосконаленню і дослідженню методів формування і обробки сигналів частотно модульованих автодинних генераторів на напівпровідникових приладах мм-діапазону.

Актуальність теми. Приймально-передавальні системи автодинного типу є малогабаритними, надійними і технологічними пристроями, які знайшли найширше застосування в системах ближньої радіолокації (СБРЛ), а також для контролю параметрів технологічних процесів і в наукових дослідженнях. Принцип роботи таких систем заснований на зміні амплітуди, частоти і робочого струму автогенератора під впливом відбитого сигналу. Ці зміни називаються автодинним відгуком. Для реєстрації автодинного відгуку застосовують схеми внутрішнього і зовнішнього детектування. При відбитті сигналу автодина від рухомого об'єкту частота автодинного відгуку дорівнює частоті Доплера. У зв'язку з цим найчастіше такі системи використовуються для вимірювання швидкості і виявлення рухомих об'єктів. Можливості використання автодинів для вимірювання дальності менш вивчені, але представляють практичний інтерес для вирішення широкого кола радіолокаційних задач.

До теперішнього часу в СБРЛ досліджені і реалізовані різні методи модуляції сигналів для вимірювання дальності - імпульсний, фазовий, частотний і їх модифікації. Аналіз результатів цих досліджень показує, що найбільш інформативними і гнучкими в застосуванні є системи з різними законами лінійної частотної модуляції (ЛЧМ). Вони дозволяють вимірювати дальність до нерухомих і рухомих об'єктів та їх швидкість переміщення, при цьому є можливість виключати вплив заважаючих сигналів від цілей, розташованих на певних відстанях. Однак застосування цих методів модуляції в автодинних СБРЛ (АСБРЛ) нашоєхується на ряд обмежень, пов'язаних зі складністю аналізу процесів, що виникають в автогенераторах при одночасному впливі на генератор власного затриманого у часі відбитого випромінювання і зміні внутрішніх параметрів генератора, обумовлених процесом ЛЧМ. Це вимагає розробки нової фізико-математичної моделі автодинних систем і проведення досліджень особливостей формування сигнальних і флуктуаційних характеристик автодинів з ЛЧМ, а також вирішення ряду прикладних задач, пов'язаних з формуванням і обробкою ЛЧМ сигналів в приймально-передавальних пристроях з широкою смугою електронної перебудови частоти при збереженні високої лінійності модуляційної характеристики генератора.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана у 2008-2017 роках у відділі теорії дифракції та дифракційної електроніки ІРЕ ім.О. Я. Усикова НАН України в рамках держбюджетних науководослідних робіт: «Електродинаміка відкритих резонансних систем і періодичних структур з композитними матеріалами; розробка когерентних джерел і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (номер держреєстрації 0107U001082, виконавець), «Розробка нових моделей і методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів у

діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц в природних неоднорідних, анізотропних середовищах і поблизу поверхонь їх розподілу для задач дистанційного зондування і радіолокації» (номер держреєстрації 0111U010476, виконавець), «Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур з композитними матеріалами і антенних систем; прямі і зворотні завдання; розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового і субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (номер держреєстрації 0111U010480, виконавець), а також в рамках цільової конкурсної програми «Багатофункціональний радіолокаційний датчик для дистанційного спостереження за наявністю рухомого складу на залізничних гірках, стрілках і переїздах і контролю його швидкості для забезпечення безпеки руху і диспетчерських функцій» (номер держреєстрації 0108U004035, виконавець).

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи: виконати теоретичні та експериментальні дослідження особливостей формування сигнальних і флуктуаційних характеристик керованих по частоті автодинних генераторів, а також розробити вдосконалені методи формування та обробки сигналів автодинів, необхідні для створення перспективних СБРЛ з ЛЧМ на напівпровідникових приладах мм-діапазону.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

- Виконати аналіз сучасного стану теорії і техніки автодинних систем з частотною модуляцією, узагальнити отримані дані і накопичений досвід попередніх досліджень з метою вибору найбільш адекватного опису фізичних процесів в досліджуваних генераторах.
- На основі розробленої математичної моделі автодинного генератора з ЧМ виконати чисельне моделювання його сигнальних, флуктуаційних і модуляційних характеристик в різних режимах і умовах роботи.
- Виконати теоретичні та експериментальні дослідження сигналів автодинного відгуку при різних видах ЧМ, а також розробити рекомендації щодо практичного використання результатів дисертаційних досліджень в СБРЛ з ЛЧМ.
- Розробити та виготовити експериментальні зразки автодинних датчиків для вимірювання швидкості і дальності до об'єкта локації, що використовують результати дисертаційних досліджень; виконати лабораторні дослідження цих зразків і провести їх натурні випробування.

Об'єкт дослідження – процеси генерації лінійно-частотно модульованого СВЧ сигналу і формування різницевого сигналу проміжної частоти автодинними напівпровідниковими радіолокаторами мм-діапазону.

Предмет дослідження – вплив нелінійності перестроювання керуючої напруги варактора на роздільну здатність радіолокатора, а також особливості формування та обробки сигналів автодинного відгуку.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі в частині, присвяченій дослідженню сигнальних, шумових і модуляційних характеристик, а також чисельному моделюванню режимів роботи автодинного генератора, були викорис-

тані методи еквівалентних електричних схем, теорії нелінійних коливань, аналітичного та чисельного рішення диференційних рівнянь. Прикладні завдання вирішувалися з використанням методів теорії синтезу і обробки ЛЧМ сигналів в радіолокації. Серед них були використані: метод статичної корекції випромінюваного ЛЧМ сигналу для підвищення роздільної здатності радіолокатора; метод синхронного збору та накопичення сигналу проміжної частоти для підвищення енергетичного потенціалу радіолокатора; алгоритм швидкого перетворення Фур'є при обробці сигналу і розрахунку дальності до цілі та її швидкості.

Наукова новизна одержаних результатів:

– *Встановлено* особливості формування сигнальних характеристик автодинного генератора з частотною модуляцією по пилкоподібному і гармонійному закону, а також ступінчастою функцією модуляції за допомогою цифрового синтезатора для різних значень параметрів автодинної системи, з використанням розробленої математичної моделі та експериментальних досліджень.

– *Розроблено* методику корекції перебудовної характеристики генератора за допомогою цифрового синтезу зондуючого сигналу, що дозволило поліпшити роздільну здатність автодинного радіолокатора.

– *Розроблено* метод підвищення енергетичного потенціалу автодинного радіолокатора за рахунок ефективного придушення паразитної амплітудної модуляції за допомогою цифрової фільтрації сигналу автодинного відгуку (сигналу проміжної частоти).

– *Розроблено* алгоритм синхронного збору і обробки автодинних сигналів для виключення зі спектру автодинного відгуку паразитних складових, що пов'язані зі стрибком частоти при її модуляції.

– *Встановлено*, що для автодинних генераторів (АГ) з ЧМ за пилкоподібним несиметричним законом існує «зональний характер» поділу області зондування по дальності (від значень величини нормованої відстані), при цьому показано, що для відбивачів розташованих поблизу меж кожної із зон, сигнальні характеристики автодина мають квазігармонійний вид.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному: в результаті проведених досліджень розроблена схема коригування форми сигналу модуляції на варакторі і розроблена методика підвищення енергетичного потенціалу приймально-передавального пристрою (ППП) радіолокаційної системи шляхом цифрової обробки сигналу, що дозволяє покращити характеристики напівпровідникових автодинних генераторів мм-діапазону.

Розроблено та апробовано математичну модель напівпровідникового автодинного генератора з варакторною перебудовою частоти мм-діапазону. Модель заснована на системі скорочених лінеаризованих диференційних рівнянь з запізненням. Проведено моделювання сигнальних характеристик автодина та вивчені особливості формування основних (нульових) і вищих гармонік сигналу автодинного відгуку для стаціонарних та рухомих об'єктів при наявності нелінійного характеру залежності частоти автодинного генератора від напруги на варакторі. Показано, що вплив такої нелінійності виражається у розширенні

спектра сигналу, що в підсумку призводить до погіршення відношення сигнал-шум. Результати таких досліджень можуть бути використані для поліпшення характеристик автодинних радіолокаційних датчиків і радіолокаторів.

Розроблений експериментальний зразок автодинного напівпровідникового радіолокатора мм-діапазону з лінійною частотною модуляцією, функціональність і характеристики якого перевищують відомі аналоги. Розроблений радіолокатор апробовано для використання в автоматизованій системі розпуску вагонів і контролю швидкості відчепів при проходженні гальмівної позиції на сортувальних гірках залізничної інфраструктури.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які одержані в дисертації, належать автору. У роботах, написаних у співавторстві, здобувач брав участь в: постановці завдання [5, 10-13]; вдосконаленні математичної моделі автодинного генератора і моделюванні його режимів роботи [4]; експериментальних дослідженнях автодинних ефектів в АГ з ЧМ [6, 8]; співставленні та аналізі результатів моделювання та експериментів [1, 7]; створенні і випробуванні лабораторних макетів і експериментальних зразків радіолокаторів і радіолокаційних датчиків та аналізі результатів випробувань [2-3, 8-9].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на засіданні кваліфікаційного семінару Інституту радіофізики та електроніки ім. Я. Усикова НАН України з проблеми «Теорія дифракції та дифракційна електроніка» і на наступних міжнародних наукових конференціях:

- 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (Ukrmico);
- 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS);
- 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT);
- 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW);
- 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves.

Публікації. Основні результати за темою дисертаційної роботи опубліковано у 13 роботах, серед яких 9 статей у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus, Scopus, Google Scholar), 3 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій і симпозіумів, і в одній статті, що додатково відображає результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку. Її повний обсяг становить 163 сторінки. У дисертації наведено 61 рисунок, список використаних джерел складається з 87 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень та визначені об'єкт, предмет, методи досліджень, взаємозв'язок проведених досліджень з науковими програмами, планами і темами, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, а також дані про публікацію результатів дисертаційної роботи.

У **розділі 1** виконано огляд робіт, присвячених дослідженням і застосуванню автодинів на електронно-вакуумних і твердотільних генераторах НВЧ і КВЧ діапазонів в системах ближньої радіолокації.

Проведено аналіз методів формування зондуючих сигналів в автодинах з імпульсною і частотною модуляцією для вирішення завдань виявлення відбиваючих об'єктів, а також вимірювання дальності і швидкості цих об'єктів. Аналіз результатів досліджень автодинів з ЧМ показав, що в таких системах до кінця не вирішені проблеми, що пов'язані з наявністю паразитної амплітудної модуляції (ПАМ), і що для успішного використання ЧМ в СБРЛ потрібно розробити більш ефективні методи зниження рівня ПАМ у вихідних сигналах автодинних приймально-передавальних пристроях з ЧМ і забезпечити необхідну лінійність закону ЧМ в широкій смузі перебудови частоти.

Проведено аналіз робіт по особливостям формування автодинних сигналів АСБРЛ з різними законами лінійної частотної модуляції, в яких для опису характеристик використовуються різні математичні моделі автодинів та різні способи подання функцій впливу власного відбитого випромінювання на генератор. Показано, що при розробці автодинної системи високої роздільної здатності зі значною девіацією частоти і високими швидкостями ЧМ необхідно досліджувати особливості формування сигналів в автодинах з ЧМ у випадку довільного співвідношення часу затримки відбитого випромінювання і періоду модуляції.

Визначено проблеми, що обмежують як технічні характеристики, так і функціональні можливості автодинних СБРЛ з ЧМ. Показано, що у зв'язку з тим, що в автодинних системах цифрові методи формування та спектральної обробки ЧМ сигналів поки не знайшли широкого застосування, потрібно подальше вдосконалення як самих методів формування і спектральної обробки сигналів, так і застосування сучасних цифрових пристроїв для їх реалізації.

Показано, що на основі твердотільних автодинних генераторів з різними законами ЧМ можливо створення малогабаритних приймально-передавальних пристроїв для радіолокаційних датчиків і радіолокаційних систем ближньої радіолокації, що дозволяють вимірювати дальність до нерухомих і рухомих цілей з можливістю виключення впливів паразитних сигналів від цілей, розташованих на певних відстанях.

У **розділі 2** побудовано математичну модель автодинного генератора з варіаторною перебудовою частоти і проведено моделювання режимів роботи автодина з частотною модуляцією.

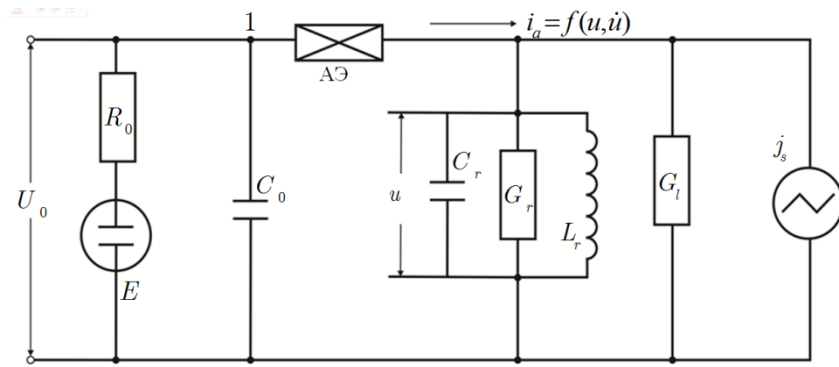


Рисунок 1 – Еквівалентна схема одноконтурного автодину

У підрозділі 2.1 розглянуто еквівалентну схему автодинного генератора з варіаційною перебудовою частоти (рис. 1). У даній конфігурації системи дефектування автодинного ефекту проводиться шляхом реєстрації зміни амплітуди на активному елементі.

У підрозділі 2.2 для опису процесів у коливальному контурі G_r - L_r - C_r (рис. 1) розглянуто наступне нелінійне диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega^2 u = F(u, \dot{u}, t, \tau), \quad (1)$$

де

$$F(u, \dot{u}, t, \tau) = -\frac{\omega_c}{Q_l} \left(\left(1 + \frac{1}{G_l} \frac{di_a(u, \dot{u})}{dt} \right) \frac{du}{dt} - \frac{1}{G_l} \frac{dj_s(t, \tau)}{dt} \right); \quad (2)$$

$\omega_c = \sqrt{L_r C_r}$; $Q_l = \omega_c C_r / (G_l + G_r)$ – навантажена добротність, u – миттєве значення напруги на коливальному контурі, i_a – миттєвий струм на активному елементі (АЕ).

Як додаткове використано рівняння балансу струмів для вузла 1 еквівалентної схеми автодинного генератора (рис. 1):

$$\frac{dU_0}{dt} = \frac{1}{R_0 C_0} \cdot (E - U_0 - R_0 I_0), \quad (3)$$

де I_0 – постійна складова струму через активний елемент, U_0 – напруга на ньому.

Система диференціальних рівнянь (1) - (3) зведена до системи неоднорідних лінеаризованих рівнянь з запізненням за допомогою методики, яка полягає в наступному:

1. У припущенні, що навантажена добротність генератора Q_l досить велика, розв'язання рівняння (2) будемо шукати у квазігармонійному вигляді $u(t) = A(t)\cos(\psi(t))$ відносно невідомих амплітуди $A(t)$ та фази $\psi(t)$.
2. Зведемо диференціальне рівняння другого порядку (2) до системи з двох диференціальних рівнянь першого порядку для функцій амплітуди і фази.
3. Застосуємо метод побудови асимптотичного наближення до вирішення нелінійного диференціального рівняння з запізненням, при цьому врахуємо тільки перше наближення до вирішення.
4. Отримаємо укорочені диференціальні рівняння для середніх значень відносних амплітуди і фази, усереднивши їх по періоду коливань.
5. Лінеаризуємо укорочені диференціальні рівняння, використовуючи розкладання в ряд Тейлора в околиці точки стаціонарності незбуреного автономного генератора.

В результаті була отримана система лінеаризованих диференціальних рівнянь з запізненням в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} \tau_0(da_0/dt) \\ \tau_p(da_1/dt) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \varepsilon_0 \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \varepsilon_1 \\ \beta_{10} & \beta_{11} & \xi_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_C \\ B_S \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\tau_0 = R_0C_0$ – постійна часу кола автозміщення, $\tau_p = 2Q_n / \omega_c$ – постійна часу резонатора; R_0 и C_0 – величини ємності і опору в колі автозміщення; $\alpha_{00}, \alpha_{01}, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \beta_{10}, \beta_{11}, \varepsilon_0, \varepsilon_1, \xi_1$ – диференціальні параметри активного елемента генератора; $a_0 = u_0 / U_0$ – відносна зміна автодинного автозміщення; $a_1 = a / A_0$ та $\chi = \Delta\omega / \omega_0$ – відносні зміни амплітуди та частоти автоколивань, де $u_0 = u - U_0$, $a = A - A_0$, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ – абсолютні зміни автозміщення u , амплітуди A та частоти ω від їх стаціонарних значень U_0, A_0 та ω_0 .

У підрозділі 2.3 наведено схему розв'язання системи рівнянь (4), що отримана в припущенні квазістаціонарності коливань і незмінності миттєвого коефіцієнта відбиття протягом одного періоду коливання. Показано, що при прийнятті таких припущень розв'язання рівняння (4) можна шукати у вигляді:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & [\omega_0 + \Delta\omega_{FM} f(t)](2l/c) - \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta\omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta - \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta\omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta - \dots \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta\omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta\} \dots\}. \end{aligned} \quad (5)$$

У підрозділі 2.4 проведено моделювання сигналу автодинного відгуку від одиночної цілі в генераторах з варакторною перебудовою частоти. На прикла-

дах спектральних діаграм автодинного відгуку від одиночної цілі проілюстровано вплив нелінійності перестроювальної характеристики.

Чисельне моделювання спектральних діаграм вихідного сигналу проводилося для двох випадків: для реального випадку (з урахуванням нелінійності перестроювальної характеристики) і «ідеального» випадку. Показано, що наявність нелінійності призводить до розширення спектра автодинного відгуку.

У підрозділі 2.5 досліджується збіжність ітераційного процесу, як процесу послідовних наближень до отримання точного розв'язання рівняння (5). Для оцінки точності наближеного розв'язання розраховується нев'язка - відносна помилка обчислення наближеного розв'язання рівняння (5) (для обчислення сигналу автодинного відгуку). Показано, що для забезпечення прийнятної точності моделювання достатньо обмежитися 3-4-мя ітераційними членами, а для відновлення спектра сигналу поблизу нульової гармоніки достатньо обмежитися лише нульовим ітераційним наближенням.

У підрозділах 2.6 та 2.7 проведено чисельне моделювання сигналу автодинного відгуку при різних дальностях до об'єкта і при різних діапазонах зміни частоти генератора, при цьому враховувався нелінійний характер залежності частоти генератора від напруги на варакторі. В результаті проведеного дослідження з'ясовано, що вплив нелінійності на сигнал автодинного відгуку виражається в розширенні його спектра (див. рис. 2).

Також в результаті моделювання було встановлено, що залежність зміни ширини спектра від відстані до об'єкта носить лінійний характер. Показано, що збільшення відстані до об'єкта призводить також до зсуву частоти сигналу автодинного відгуку в сторону більш високих частот (див. рис. 3).

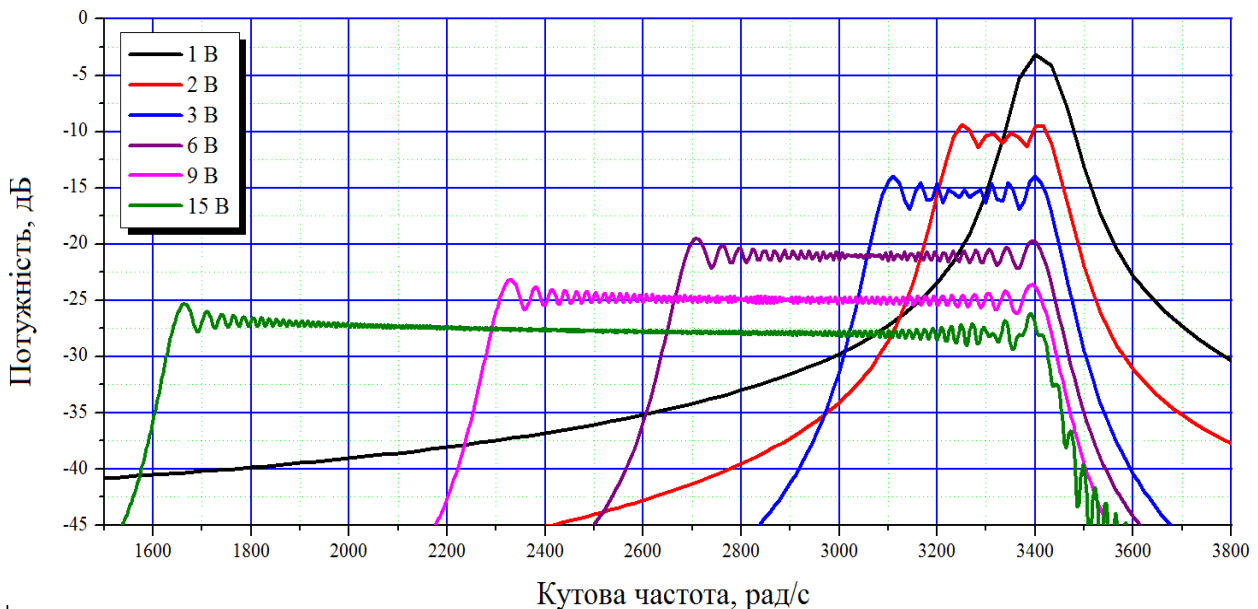


Рисунок 2 – Спектри автодинного відгуку при різних діапазонах зміни частоти генератора

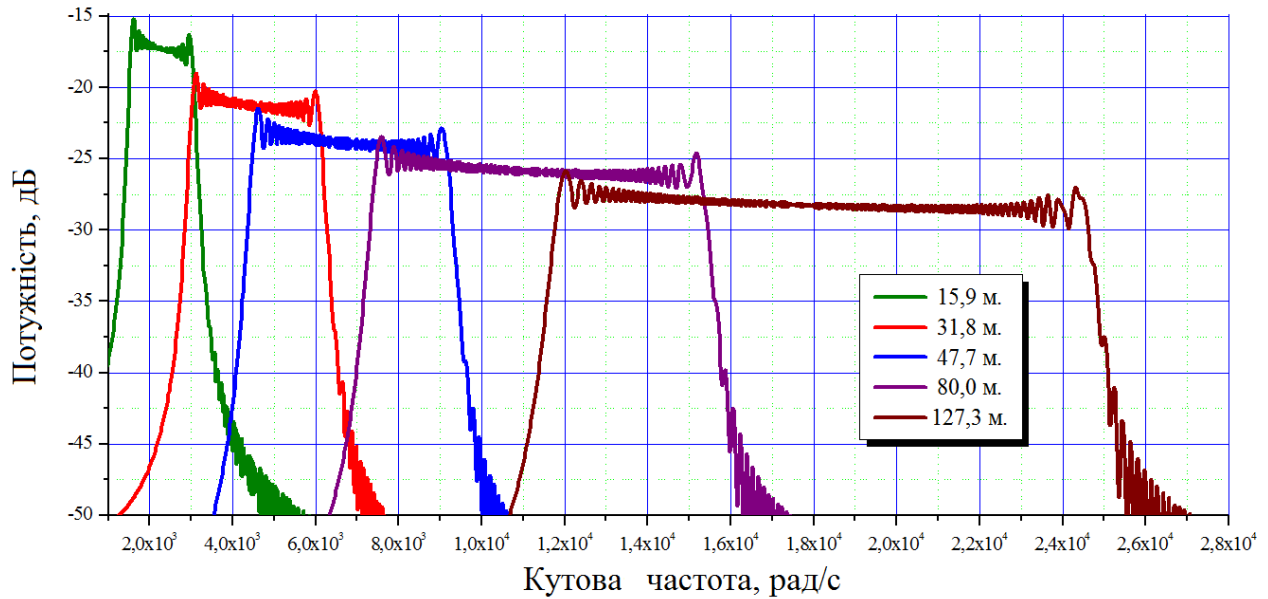


Рисунок 3 – Спектри автодинного відгуку при різних відстанях до відбиваючого об'єкту

У підрозділі 2.8 та 2.9 побудовано модель сигналу автодинного відгуку, яка дозволяє враховувати вплив як фліккерних флуктуацій напруги (шумів) джерела живлення, так і температурних шумів на сигнал автодинного відгуку. Вирази для розрахунку СХА мають наступний вигляд:

$$\chi(t, \tau) = -K_{fm} e_{fm} f(t) - \Gamma L_a \cdot \sin[\delta(t, \tau) + \theta] - \chi_n(t) - K_{fn} e_n(t), \quad (6)$$

$$a_1(t, \tau) = -K_{am} e_{fm} f(t) + \Gamma K_a \cdot \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1] + a_n(t) - K_{am} e_n(t), \quad (7)$$

де e_{fm} – відносна ЕРС модулюючого впливу від зміни напруги зсуву ДГ генератора; K_a – коефіцієнт автодинного підсилення (вказує у скільки разів зміна амплітуди коливань перевищує амплітуду відбитого сигналу); L_a і K_0 – коефіцієнти автодинної девіації частоти і автодетектування відповідно; K_{am} , K_{fn} , K_d – коефіцієнти амплітудної модуляції, частотної модуляції і прямої передачі відповідно.

За допомогою цієї моделі було оцінено вплив флікер-шумів на спектральні характеристики сигналу автодинного відгуку у випадку, коли модельні параметри відповідали реально діючим (існуючим) системам. Для моделювання флікер-шумів джерела живлення використовувалася функція спектральної щільності потужності шуму і розглядалася відповідна образ-функція спектра Фур'є:

$$a_{fn}(f) = p(f) \cdot \sqrt{N_{fn}/f^\alpha} = p(f) \cdot \sqrt{10^{-10}/f^{0.7}},$$

де $p(f) = \exp(2i \cdot \arccos(\text{rand}(-1..1)))$ – функція, що визначає значення фази в кожній спектральній точці заданого діапазону частот $0,001 \div 10$ кГц, та дорівнює нулю поза межами заданого діапазону.

Також в підрозділі 2.9 зазначено, що на практиці впливом теплових шумів на сигнал автодинного відгуку можна знехтувати з огляду на використання високочастотних фільтрів в конструкціях розглянутих пристроїв.

У розділі 3 розглянуто особливості сигнальних характеристик автодинів (СХА) в генераторах з ЧМ за пилкоподібним законом із симетричною формою, з несиметричною формою, за гармонійним законом, а також при формуванні модулюючої функції за допомогою цифрового синтезатора. Вказана специфіка застосування автодинних генераторів для вирішення завдань ближньої радіолокації.

У розділі також проведено аналіз зв'язку енергетичного потенціалу РЛС з дальністю дії РЛС і співвідношенням потужності прийнятого сигналу до потужності шумів в смузі частот ПЧ. Запропоновано спосіб підвищення енергетичного потенціалу автодинного генератора з ЛЧМ, а також спосіб приведення рівня корисного сигналу до динамічного діапазону АЦП.

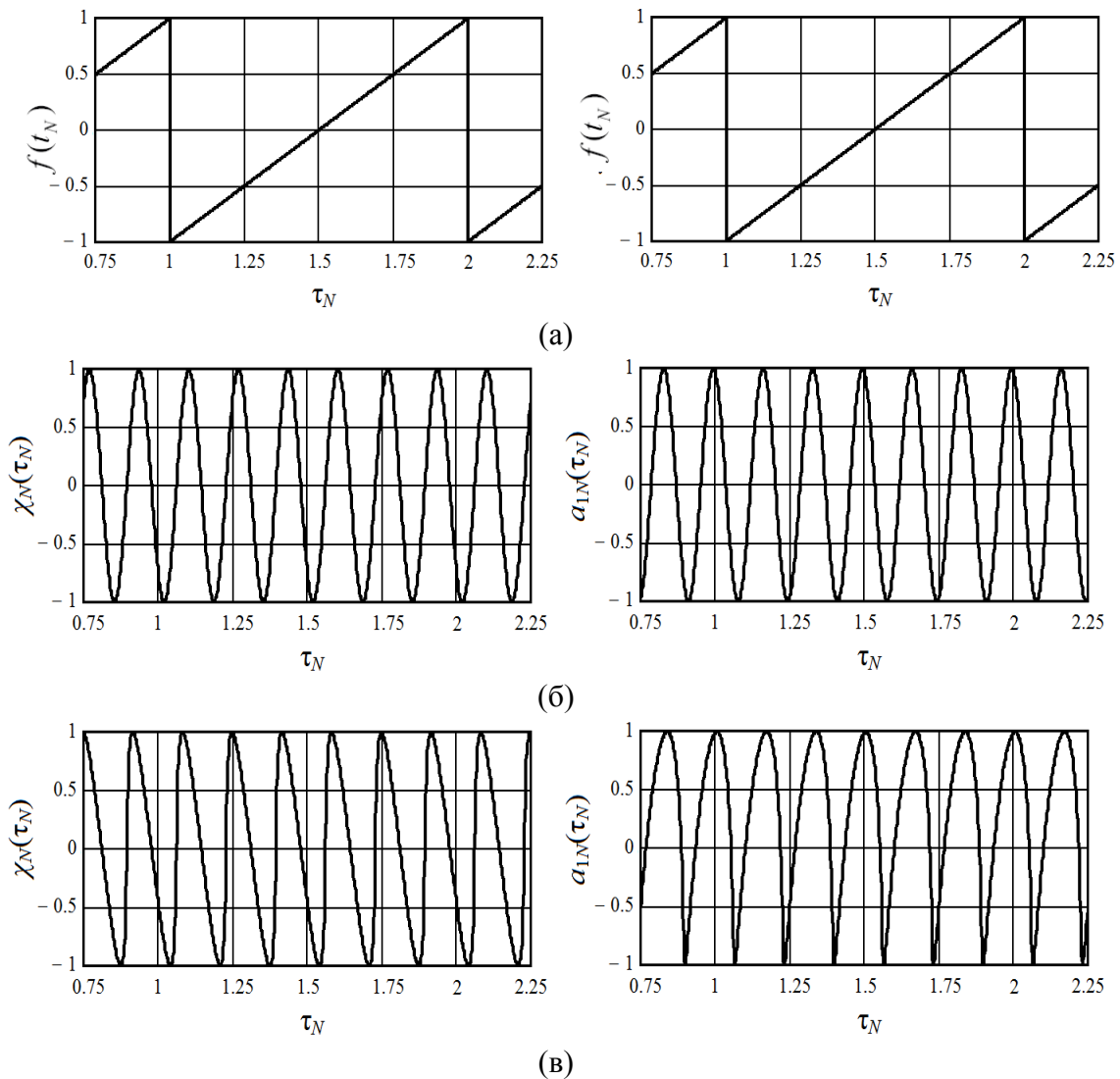


Рисунок 4 – Часові діаграми ЧХА $\chi_N(t_N, \tau)$ та АХА $a_{1N}(t_N, \tau)$ АСБРЛ з ЧМ при різних значеннях зовнішнього зворотнього зв'язку: (б) – $p \ll 1$, (в) – $p \approx 1$

У підрозділі 3.1 проведено дослідження властивостей сигналу автодинного відгуку від рухомих і нерухомих об'єктів при різних видах ЧМ. Для цього отримані вирази і досліджені нормовані сигнальні характеристики автодинних СБРЛ (ЧХА $\chi_N(t_N, \tau)$ та АХА $a_{1N}(t_N, \tau)$) для наступних видів ЧМ: ЛЧМ за пилкоподібним законом з несиметричною формою, ЛЧМ за симетричним пилкоподібним законом, за гармонійним законом і при формуванні модулюючої функції за допомогою цифрового синтезатора. Вирази для розрахунку ЧХА $\chi_N(t_N, \tau)$ та АХА $a_{1N}(t_N, \tau)$ отримані з (6) та (7) в припущенні $t_N = t/T_M$, де T_M – період модуляції, а також виключивши з розгляду шумові складові $\chi_n(t)$, $a_n(t)$, $e_n(t)$, та складові обумовлені ПАМ. Аналіз результатів виконаних розрахунків СХА автодинних СБРЛ з ЧМ показав, що частота автодинного сигналу як для рухомого, так і нерухомого відбивача відповідає частоті перетвореного сигналу, що може бути одержаний в радіолокаційних системах гомодінного типу в аналогічних умовах. Однак наявність спотворень автодинних сигналів і значне збагачення спектру при величині зворотнього зв'язку $p \approx 1$ вимагають додаткового врахування при обробці.

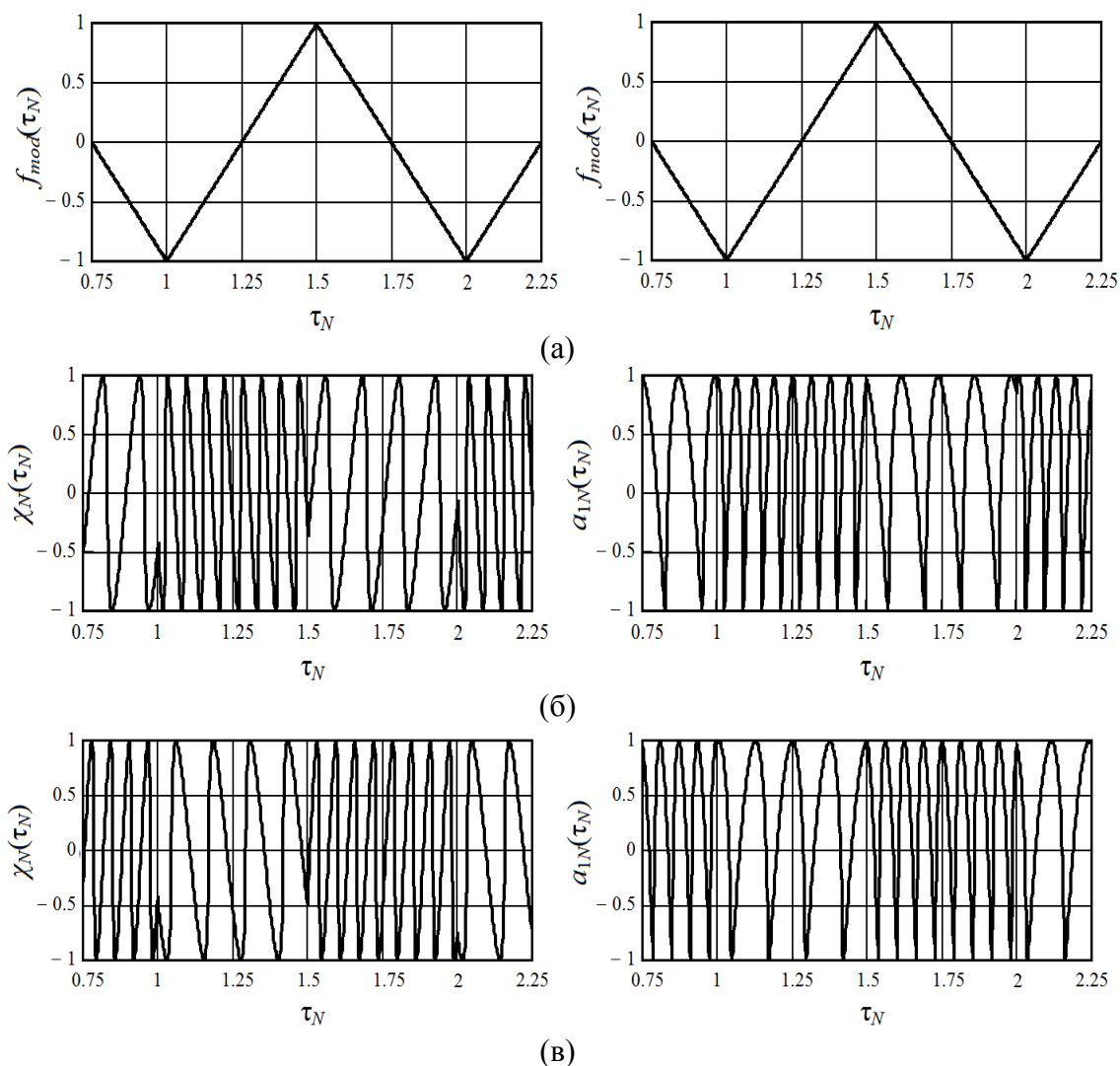


Рисунок 5 – Часові діаграми ЧХА $\chi_N(t_N, \tau)$ та АХА $a_{1N}(t_N, \tau)$ АСБРЛ з ЧМ у випадку рухомого відбивача: (б) – об'єкт локації наближується (в) – об'єкт локації віддаляється

Параметр $p = \Delta\omega_{SM} \cdot 2l/c$ називають також параметром спотворень автодинного сигналу для заданої відстані до об'єкта l і девіації частоти автоколивань $\Delta\omega_{SM}$.

Було показано, що в разі сильного зовнішнього зворотнього зв'язку СХА набувають характерних ангармонічних спотворень – з'являються «хвилі» сигналу (проілюстровано на рис. 4(в)) для випадку модуляції за несиметричним пилкоподібним законом, див. рис. 4(а)). У той же час такі спотворення нехтовно малі в разі слабкого зовнішнього зворотнього зв'язку (рис. 4 (б)). «Хвилі» сигналу мають нахил (істотно більш виражений для ЧХА), що обумовлено неізохронністю генератора, знаком і величиною похідної модулюючої функції.

У разі частотної модуляції за симетричним пилкоподібним законом (рис. 5(а)) і рухомим відбивачем відзначені наступні особливості СХА: при наближенні відбивача – збільшення частоти СХА на наростаючому напівперіоді ЧМ і зменшення його частоти на спадаючому напівперіоді (рис. 5 (б)); при віддаленні відбивача – зменшення частоти СХА на наростаючому напівперіоді ЧМ і збільшення на спадаючому (рис. 5 (в)). Зазначені явища можуть бути використані в алгоритмах обробки сигналів в різних СБРЛ з ЧМ для отримання інформації про дальність, швидкість та напрямок руху об'єкта.

У підрозділі 3.2 представлені результати дослідження властивостей спектрів СХА. Для цього було проведено їх моделювання і порівняння з експериментально отриманими даними. Було встановлено, що при несиметричній пилкоподібній модуляції зі збільшенням нормованої відстані до об'єкта r_n (яку для зручності розгляду визначимо як $r_n = \tau / T_a$, де τ – час затримки сигналу відгуку, а T_a – період частотної модуляції) ступінь ангармонічних спотворень діаграм АХА та ЧХА і, відповідно, рівень вищих гармонійних складових значно знижується (рис. 6), що особливо виражено в зоні, де $0 \leq r_n \leq 1$.

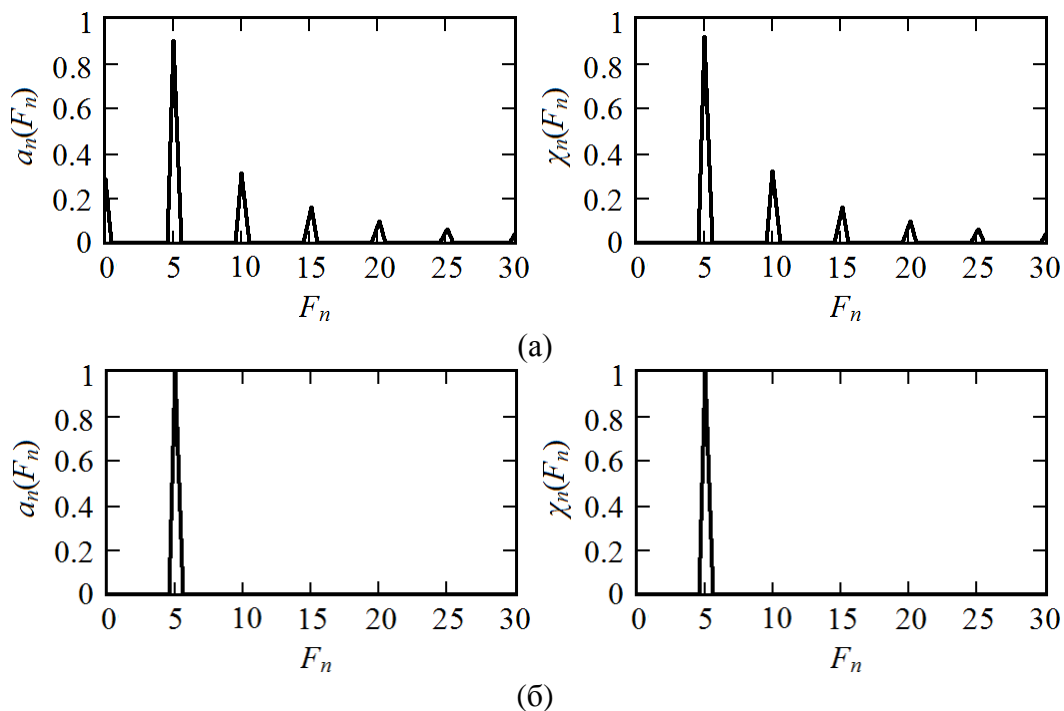


Рисунок 6 – Спектри $a_n(F_n)$ та $\chi_n(F_n)$ для випадка $r_n = 0$ (а), $r_n = 1$ (б)

Для оцінки ступеня спотворення квазіперіодичних коливань в роботі використовувався коефіцієнт нелінійних спотворень (КНС), результати розрахунку якого як функції нормованої відстані представлено на рис. 7. Найбільші спотворення сигналів АСБРЛ з ЧМ спостерігаються в області малих значень нормованої відстані r_n в першій «робочій зоні» ($0 \leq r_n \leq 1$). При величині параметра $p=0,8$ КНС в цій зоні досягає значення близько 40%. З подальшим переходом в робочі зони вищого порядку спотворення сигналів значно зменшуються, досягаючи мінімальних значень на нормованих відстанях r_n , кратних цілому числу ($r_n=1,2,\dots$).

Також проведено дослідження залежності КНС (рис. 8) для випадку гармонійної модуляції, тут крива 1 - відповідає значенню параметра $p=0,4$, а крива 2 - значенню параметра $p=0,8$. Встановлено, що найбільші спотворення сигналів спостерігаються в першій половині робочої зони. При величині параметра $p=0,8$ коефіцієнт гармонік тут досягає значення 60%. Зазначимо що,

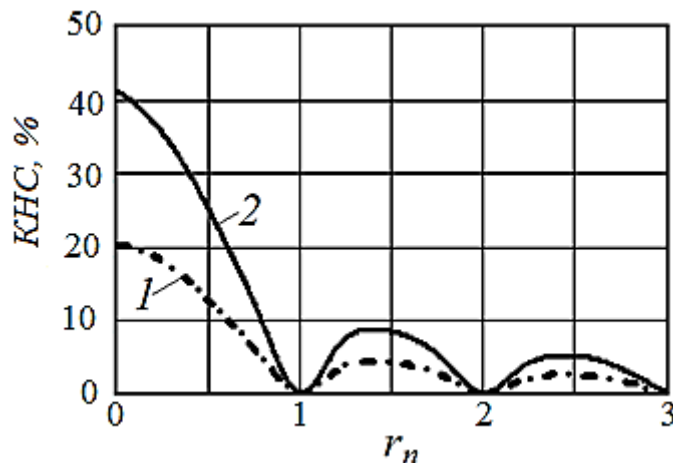


Рисунок 7 – Графіки залежності КНС від нормованої відстані r_n при $p=0,4$ (крива 1) та $p=0,8$ (крива 2) у випадку несиметричній пилкоподібній модуляції

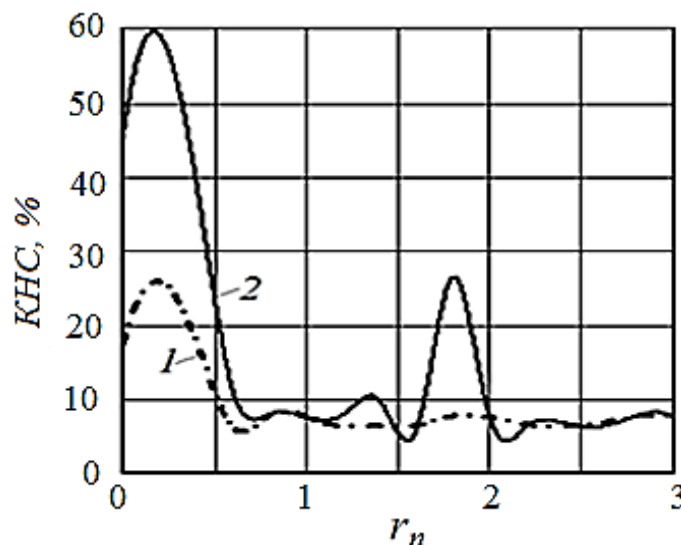


Рисунок 8 – Графіки залежності КНС від нормованої відстані r_n при $p=0,4$ (крива 1) та $p=0,8$ (крива 2) у випадку гармонійної модуляції

при переході в наступні робочі зони вищого порядку КНС значно зменшується, досягаючи мінімальних значень на нормованих відстанях r_n , кратних цілому числу ($r_n=1,2,\dots$), коефіцієнт нелінійних спотворень тут помітно вище, ніж в разі лінійного закону ЧМ.

Проведені теоретичні дослідження підтверджуються отриманими експериментальними даними. Так, на рис. 9 представлено експериментально встановлені спектральні діаграми СХА, що були зареєстровані у випадку несиметричної пилкоподібної частотної модуляції при віддзеркаленні від кутового відбивача (а) і від стіни п'ятиповерхового будинку (б). Кутовий відбивач з ефективною площею розсіювання близько 10 м^2 встановлювався на відстані $l = 3 \text{ м}$ від розтрубу антени АСБРЛ. Стіна будинку знаходилася на відстані $l = 60 \text{ м}$.

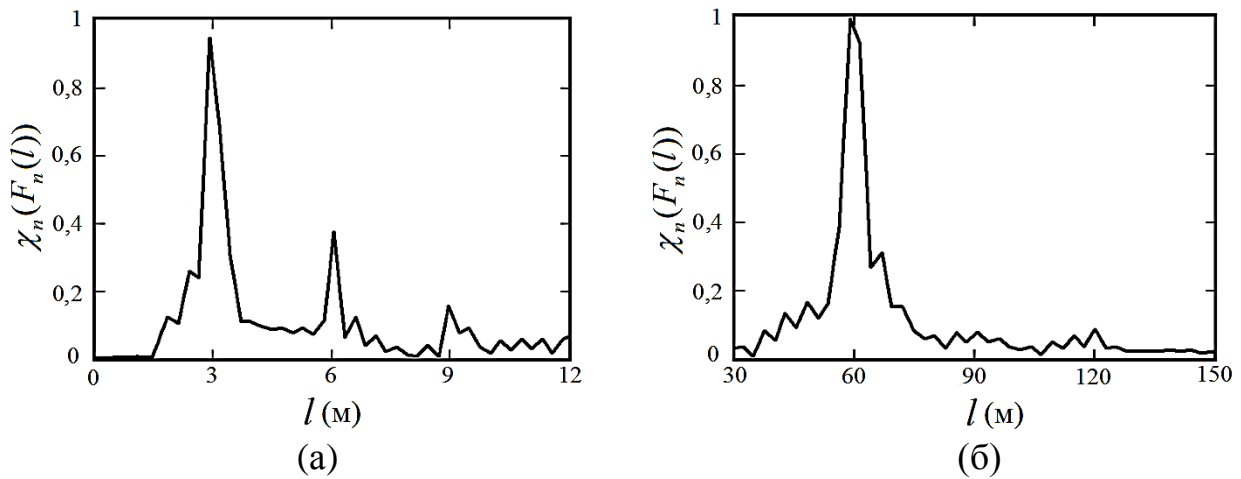


Рисунок 9 – Спектральні діаграми автодинних сигналів у разі віддзеркалення від кутового відбивача (а) і від стіни п'ятиповерхового будинку (б)

У разі кутового відбивача (рис. 9 (а)) на графіку спектра СХА видно другу і третю вищі гармоніки, характерні для ангармонійних спотворень СХА. У випадку стіни будівлі вищі гармонійні складові сигналу практично відсутні. Графіки, зображені на рис. 9 (а,б), демонструють якісний збіг експериментально отриманих спектральних характеристик СХА з теоретично передбаченими (рис.6 (а,б)).

У підрозділі 3.3 досліджено особливості застосування автодинних генераторів з ЛЧМ в системах ближньої радіолокації. Було встановлено, що співвідношення сигнал-шум і роздільну здатність РЛС ближнього радіусу дії можливо підвищити шляхом статичної корекції форми зондуючого імпульсу. Також в даному підрозділі наведено аналіз зв'язку основного рівняння радіолокації і основних характеристик, що входять до нього з енергетичним потенціалом автодинної РЛС. Показано, що рівень співвідношення сигнал-шум корисного сигналу пропорційний енергетичному потенціалу автодина в разі відсутності зовні-

шніх перешкод і шумів. Зроблена оцінка впливу шумів джерела живлення і внутрішніх шумів генератора на спектр сигналу автодинного відгуку РЛС з цифровою обробкою сигналу і розглянуто можливі способи аналогової і цифрової фільтрації, що дозволяють підвищити співвідношення сигнал-шум корисного сигналу.

Запропоновано схему лінеаризації перестроювальної характеристики шляхом статичної корекції керуючої напруги на варакторі. Також запропоновано підхід до формування такої нелінійної характеристики з використанням цифрового сигнального процесора. Знайдено закон зміни коригуючої керуючої напруги як функції часу для діодів Ганна, які використовувалися для побудови експериментальних зразків – радіолокаційного датчика і оглядового радіолокатора, що описані у розділі 4 даної дисертаційної роботи.

У розділі 4 описано експериментальний зразок автодинного радіолокаційного датчика безперервної дії з лінійною частотною модуляцією і експериментальний зразок оглядового автодинного радіолокатора 8-мм діапазону.

У підрозділі 4.1 описані загальна структурна і функціональна схемі розробленого автодинного радіолокаційного датчика. Обґрунтовано вибір системи детектування сигналу автодинного відгуку, а також описані технологічні аспекти виготовлення експериментального зразка датчика.

У підрозділі 4.2 розглянуто методику виявлення об'єктів в зоні дії радіолокаційного датчика в разі його застосування для вирішення завдань контролю зайнятості стрілочних переводів на залізничних сортувальних гірках і переїздах. Описано цифровий програмний спосіб формування зондуючого ЛЧМ-радіоімпульсу, а також метод детектування і наступної цифрової обробки сигналу проміжної частоти.

Для формування зондуючого сигналу застосовувався цифровий спосіб формування ЛЧМ радіоімпульсу, заснований на синтезі сигналу по заздалегідь сформованій таблиці значень керуючої напруги на варакторі з урахуванням його нелінійної характеристики. Реєстрація сигналу автодинного відгуку проводилася за допомогою датчика струму, що вимірював зміну струму в колі живлення генератора на основі діода Ганна.

У підрозділі 4.3 наведено функціональну та структурну схеми розробленого оглядового автодинного локатора. Наведено результати лабораторних випробувань локатора на прикладі виявлення малорозмірного кутового відбивача на фоні багатоповерхових будівель.

У підрозділі 4.4 описано методику проведення та отримані результати натурних випробувань автодинного радіолокаційного датчика. Перевірка робочих характеристик радіолокаційного датчика була проведена на Харківській малій південній залізниці, а також на залізничних переїздах і сортувальних гірках Південної залізниці. Об'єктами спостереження виступали рухомі склади, що складаються з локомотива та різної кількості вагонів.

В результаті експериментальних досліджень показана можливість застосування радіолокаційного датчика в складі системи залізничної автоматики для автоматизації формування та розформування складів на сортувальних гірках.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна задача поліпшення характеристик автодинних напівпровідникових ЛЧМ радіолокаторів ближнього радіусу дії мм-діапазону. Проведено моделювання, дослідження формування та обробка сигналів автодинного відгуку від стаціонарних та рухомих об'єктів з наступними видами частотної модуляції: пилкоподібна симетрична та несиметрична, ступінчаста квазі-пилкоподібна та гармонійна. В ході виконання роботи для верифікації результатів досліджень були виготовлені експериментальні зразки автодинного радіолокаційного датчика та оглядового автодинного локатора 8-мм діапазону. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Розроблено та апробовано математичну модель напівпровідникового автодинного генератора мм-діапазону з варакторною перебудовою частоти, з використанням системи скорочених лінеаризованих диференціальних рівнянь з запізненням, відносно наступних сигнальних характеристик автодина: ЧХА, АХА і ХАД.
2. Проведено моделювання СХА та вивчені особливості формування основних (нульових) і вищих гармонік сигналу автодинного відгуку для стаціонарних та рухомих об'єктів при наявності нелінійного характеру залежності частоти АГ від напруги на варакторі. В результаті проведеного моделювання показано, що вплив такої нелінійності виражається в розширенні спектра сигналу, що в результаті призводить до погіршення співвідношення сигнал-шум.
3. Виявлено «зональний характер» поділу області зондування по дальності (від значень величини нормованої відстані) для АГ з ЧМ з пилкоподібним несиметричним законом зміни керуючої напруги. З використанням методів спектральної обробки сигналів показано, що для відбивачів, розташованих поблизу меж кожної із зон, сигнальні характеристики автодина мають квазігармонічний вигляд (автодин працює в «режимі гомодина»).
4. Запропоновано і апробовано метод лінеаризації перебудовної характеристики напівпровідникового АГ на діоді Ганна шляхом статичної корекції керуючої напруги на варакторі з використанням цифрового сигнального процесора.
5. Зроблена оцінка впливу шумів джерела живлення і внутрішніх шумів генератора на спектр сигналу автодинного відгуку РЛС з цифровою обробкою сигналу та знайдені схеми аналогової і цифрової фільтрації, використання яких дозволяє підвищити відношення сигнал-шум.
6. Розроблено експериментальні та лабораторні зразки радіолокаційного датчика та оглядового автодинного локатора 8 мм-діапазону.
7. Розроблена та апробована на об'єктах діючої залізничної інфраструктури методика використання автодинного радіолокаційного датчика для контролю зайнятості стрілочних переводів та виявлення об'єктів на залізничних сортувальних гірках і переїздах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Варавин А.В. Автодинный приёмо-передающий модуль на диоде Ганна с внутреннем детектированием сигнала для радиолокационного датчика с линейной модуляцией частоты / А. В. Варавин, А. С. Васильев, Г. П. Ермак, И. В. Попов // Радиофизика и электроника: сб.науч.тр./НАН Украины. ИРЭ им. А.Я.Усикова. –2008. – Т. 13, № 3.– С.546–551.
2. Ермак Г.П. Обзорный автодинный радиолокатор миллиметрового диапазона / Г. П. Ермак, А. В. Варавин, А. С. Васильев, И. В. Попов, А. П. Евдокимов, В. В. Крыжановский // Радиофизика и электроника: сб.науч.тр./ НАН Украины. ИРЭ им. А.Я.Усикова / –2010. – Т. 1, № 4.– С. 85–91.
3. Ермак Г.П. Радиолокационный датчик контроля занятости пути и скорости подвижного состава на территориях сортировочных горок / Г. П. Ермак, А. В. Варавин, И. В. Попов, А. С. Васильев, Л. С. Усов // Наука и инновации. – 2009. – Т. 5. – С.9–16.
4. Носков В.Я. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов / В. Я. Носков, А. В. Варавин, А. С. Васильев, Г. П. Ермак, Н. М. Закарлюк, К. А. Игнатков, С. М. Смольский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – Т. 3. –С.32–86.
5. Носков В.Я. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией / В. Я. Носков, А. С. Васильев, Г. П. Ермак, К. А. Игнатков, А. П. Чупахин // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника – 2017. – Т. 60, № 3. – С.154–165.
6. Noskov V.Y. Signals of autodyne radars with frequency modulation according to symmetric saw-tooth law / V. Y. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupahin, A. S. Vasiliev, G. P. Ermak, S. M. Smolskiy // Telecommun. Radio Eng. – 2016. – Т. 75, № 17. – С.1551–1566.
7. Noskov V.Y. Parameters' calculation of autodyne sensors taking into account the noise of the power source / V. Y. Noskov, A. S. Vasilev, G. P. Ermak, K. A. Ignatkov, A. P. Chupakhin // Telecommun. Radio Eng. – 2016. – Т. 75, № 5. – С.441–454.
8. Noskov V.Y. Output, signal and noise parameters of autodynes with a rigid conductance characteristic of an active element / V. Y. Noskov, A. S. Vasiliev, G. P. Ermak, K. A. Ignatkov, D. Y. Mishin, S. M. Smolskiy, A. P. Chupahin // Telecommun. Radio Eng. – 2016. – Т. 75, № 20. – С.1857–1873.
9. Yermak G.P. Autodyne millimeter band surveillance radar / G. P. Yermak, A. V. Varavin, A. S. Vasiliev, I. V. Popov, A. P. Yevdokimov, V. V. Kryzhanovsky // Telecommun. Radio Eng. – 2011. – Т. 70, № 18. – С.1673–1683.
10. Vasiliev A.S. et al. Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law // 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). IEEE, 2017. P. 1–4.

11. Vasiliev A.S. et al. Signals from a moving object of autodyne radars with linear frequency modulation // 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). IEEE, 2017. P. 93–98.

12. Vasiliev A.S. et al. Influence of the autodyne oscillator coupling degree with antenna upon its transfer and noise characteristics // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). IEEE, 2017. P. 348–353.

13. Noskov V.Y. Peculiarities of signal formation of autodyne radars with linear frequency modulation / V. Y. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupahin, A. S. Vasiliev, G. P. Ermak, S. M. Smolskiy // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Серия Радиотехника, Радиоаппаратостроение – 2016. – № 67. – С.50–57.

АНОТАЦІЯ

Васильєв О. С. Особливості формування та обробки сигналів автодинного відгуку в задачах ближньої радіолокації - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2018.

Дана робота присвячена розробці, вдосконаленню і дослідженню методів формування і обробки сигналів частотно модульованих автодинних генераторів на напівпровідникових приладах мм-діапазону.

Розроблено та апробовано математичну модель напівпровідникового автодинного генератора мм-діапазону з варакторною перебудовою частоти. Модель заснована на системі укорочених лінеаризованих диференціальних рівнянь з запізненням відносно частотної і амплітудної характеристик автодина. Проведено моделювання сигнальних характеристик автодина та вивчені особливості формування основних (нульових) і вищих гармонік сигналу автодинного відгуку для стаціонарних і рухомих об'єктів при наявності нелінійного характеру залежності частоти автодинного генератора від напруги на варакторі. Показано, що вплив такої нелінійності виражається в розширенні спектра сигналу, що в результаті призводить до погіршення співвідношення сигнал-шум. Виявлено «зональний характер» поділу області зондування по дальності (від значень величини нормованого радіуса) для автодинного генератора з частотною модуляцією за пилкоподібним несиметричним законом. Показано, що для відбивачів, розташованих поблизу меж кожної із зон, сигнальні характеристики автодина мають квазігармонійний вигляд (автодин працює в «гомодінному режимі»).

Запропоновано та апробовано метод лінеаризації перестроювальної характеристики автодина на діоді Ганна шляхом статичної корекції керуючої напруги на варакторі з використанням цифрового сигнального процесора. На підставі проведених в дисертаційній роботі досліджень розроблені експериментальні та лабораторні зразки радіолокаційного датчика та оглядового автодинного локатора 8 мм-діапазону з цифровою обробкою сигналу.

Ключові слова: Автодин, ближня радіолокація, частотна модуляція, сигнальні характеристики автодина.

АННОТАЦІЯ

Васильев А. С. Особенности формирования и обработки сигналов автодинного отклика в задачах ближней радиолокации - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2018.

Данная работа посвящена разработке, усовершенствованию и исследованию методов формирования и обработки сигналов частотно модулированных автодинных генераторов на полупроводниковых приборах мм-диапазона.

Разработана и апробирована математическая модель полупроводникового автодинного генератора мм-диапазона с варакторной перестройкой частоты. Модель основана на системе укороченных линеаризованных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом относительно частотной и амплитудной характеристик автодина. Проведено моделирование сигнальных характеристик автодина и изучены особенности формирования основных (нулевых) и высших гармоник сигнала автодинного отклика для стационарных и подвижных объектов при наличии нелинейного характера зависимости частоты автодинного генератора от напряжения на варакторе. Показано, что влияние такой нелинейности выражается в уширении спектра сигнала, что в результате приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум. Выявлен «зональный характер» разделения области зондирования по дальности (от значений величины нормированного расстояния) для автодинного генератора с частотной модуляцией по пилообразному несимметричному закону. Показано, что для отражателей, расположенных в окрестности границ каждой из зон, сигнальные характеристики автодина имеют квазигармонический вид (автодин работает в «режиме гомодина»).

Предложен и апробирован метод линеаризации перестроечной характеристики автодина на диоде Ганна путем статической коррекции управляющего напряжения на варакторе с использованием цифрового сигнального процессора. На основании проведенных в диссертационной работе исследований разработаны экспериментальные и лабораторные образцы радиолокационного датчика и обзорного автодинного локатора 8 мм-диапазона с цифровой обработкой сигнала.

Ключевые слова: Автодин, ближняя радиолокация, частотная модуляция, сигнальные характеристики автодина.

ABSTRACT

Vasyliiev O.S. Features of the forming and processing of a self-mixing generator signal in a short-range remote sensing problem. As a manuscript.

Thesis for Ph.D. degree in Physics and Mathematics with the specialization area 01.04.03 Radiophysics. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

This work is devoted to the development, improvement and investigation of methods for generating and processing of response signals of frequency-modulated self-mixing generators (autodynes) in the mm-range.

A mathematical model of a semiconductor self-mixing generator with varactor frequency tuning has been developed and tested. The model is based on a system of truncated linearized differential equations with a delayed argument for the relative to the frequency and amplitude characteristics of the autodyne. Modeling of signal characteristics of an autodyne is carried out and features of forming of the main (zero) and higher harmonics of the autodyne response signal are studied. Two types of targets have been considered are stationary and mobile objects. The nonlinearity of varactor frequency tuning has been taking into account. As a result of the study, it is shown that the influence of such nonlinearity is expressed in the broadening of the signal spectrum. That decreases the signal-to-noise ratio. The in-range "zonal nature" of the autodyne response signal characteristics has been found for the case of the radar frequency modulation according to a "sawtooth asymmetric law". It is shown that for the reflectors which are located in the nearby the boundaries of each of the zones, the signal characteristics of the autodyne have a quasiharmonic form (autodyne operates in the "homodyne regime").

A method for linearizing of the tuning characteristic for the autodyne on a Gunn diode is proposed and studied. It is based on a static correction of a control voltage on the varactor within the using of a digital signal processor. Based on the studied features of the self-mixing generator with varactor frequency tuning, experimental and laboratory samples of the radar sensor and 8 mm-range surveillance autodyne radar with digital signal processing have been developed.

Keywords: self-mixing generator, short-range radar, frequency modulation, signal processing and millimeter wave band.

