

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.121>
УДК 621.396.967+621.382.2.029.64

Г.П. Єрмак, О.С. Васильєв, А.В. Варавін, М.В. Балабан, О.В. Фатєєв, В.М. Желтов

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова НАНУ
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: ermak@ire.kharkov.ua

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ
ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АВТОДИННОГО РАДІОЛОКАТОРА
З ШИРОКОЮ СМУГОЮ МОДУЛЯЦІЇ ЧАСТОТИ
Частина 2. Підвищення роздільної здатності автодинного
радіолокатора шляхом квазістатичної корекції зондувального імпульсу

Предмет і мета роботи. На основі математичної моделі автодинного автогенератора з електронним перестроюванням частоти розглядаються особливості формування сигналів у автодинному радіолокаторі за наявності нелінійності модуляційної характеристики. Метою досліджень є розроблення цифрового способу корекції закону частотної модуляції зондувального випромінювання та обробки сигналів автодинної системи ближньої радіолокації (СБРЛ) для підвищення роздільної здатності за дальністю і точності вимірювання відстані до відбивача.

Методи та методологія. Для аналізу процесів формування випромінюваних та оброблення автодинних сигналів використовувалися методи чисельного моделювання спектральних, частотних та амплітудних характеристик сигналів, що приймаються, і методи спектральної обробки результатів експериментальних досліджень автодинного радіолокатора з частотною модуляцією.

Результати. Знайдено закон зміни коригувальної керуючої напруги як функції часу для автодинного приймально-передавального модуля 8-мм діапазону з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) на основі діода Ганна. Експериментальні дослідження проводилися за допомогою автодинної СБРЛ 8-мм діапазону з несиметричним законом ЛЧМ зі смугою перестроювання частоти до 500 МГц. Застосування цифрових способів корекції закону частотної модуляції у автодинній СБРЛ дозволило підвищити точність вимірювання відстані до 0.3 м, а роздільну здатність за дальністю — до 0.6 м, що відповідає теоретичній межі гомодинних СБРЛ з ЛЧМ зі смугою перестроювання частоти 500 МГц.

Висновки. Застосування методу лінеаризації модуляційної характеристики генератора та принципу цифрової обробки автодинного сигналу в СБРЛ з ЛЧМ дозволяє вирішити задачу досягнення гранично високих показників за точністю та роздільною здатністю при вимірюванні дальності до об'єктів локації. Результати роботи можуть використовуватися при створенні радіолокаційних датчиків і радіохвильових вимірювачів з поліпшеними параметрами та характеристиками.

Ключові слова: автодин, автодинний сигнал, частотна модуляція, нелінійність модуляційної характеристики, система ближньої радіолокації, генератор на діоді Ганна, варактор.

Ц и т у в а н н я: Єрмак Г.П., Васильєв О.С., Варавін А.В., Балабан М.В., Фатєєв О.В., Желтов В.М. Особливості формування та обробки сигналів автодинного радіолокатора з широкою смугою модуляції частоти. Ч. 2. Підвищення роздільної здатності автодинного радіолокатора шляхом квазістатичної корекції зондувального імпульсу. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27, № 2. С. 121—128. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.121>

C i t a t i o n: Ermak, G.P., Vasilev, O.S., Varavin, A.V., Balaban, M.V., Fateev, O.V., Zheltov, V.M., 2022. Signal Formation and Processing Features from Autodyne Radar with a Wide Frequency Modulation Band. Part II. Increasing the Resolution of Autodyne Radar by Quasi-Static Correction of the Probe Pulse. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(2), pp. 121—128. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.121>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CCBY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

У першій частині роботи [1] на основі математичної моделі автодинного автогенератора з електронним перестроюванням частоти було проведено аналіз особливостей формування сигналів у автодинному радіолокаторі з широкою смугою частотної модуляції за наявності нелінійності модуляційної характеристики. Як впливає з результатів цих досліджень, навіть невеликі (менш ніж 10 %) значення нелінійності форми модулюючої функції призводять до значного розширення спектра вихідного сигналу, що може знижувати роздільну здатність автодинної СБРЛ.

У зв'язку з цим, поряд із питаннями вибору виду модулюючої функції та форми модулюючого сигналу для автодинів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), не менш важливим завданням є розроблення методів лінеаризації закону частотної модуляції зондувального випромінювання та обробки вихідних сигналів.

В автодинних вимірювальних і радіолокаційних системах минулих років використовувалися аналогові схеми формування та обробки сигналів. Однак застосування аналогових методів формування сигналу в деяких випадках не дозволяє реалізувати граничні значення динамічного діапазону і роздільної здатності за дальністю в автодинних СБРЛ.

Останніми роками, у зв'язку зі значним прогресом у створенні та виробництві, швидкодіючі цифрові прилади (АЦП, ЦАП і мікропроцесори) стали використовувати і в системах ближньої радіолокації, у тому числі для реалізації цифрових способів формування та спектральної обробки сигналів. Проте в автодинних системах вони до цього часу не знайшли широкого застосування. З цієї причини дослідження щодо розроблення та використання методів цифрової спектральної обробки сигналів у автодинах з ЛЧМ є актуальними. Публікацій за цією тематикою мало, хоча інтерес до таких робіт зростає як в Україні, так і за її межами.

У роботі [2] описано автоматизовану вимірювальну установку для дослідження спектрів і параметрів високо- та низькочастотних сигналів у автодинах. Установка дозволяє проводити експериментальні дослідження щодо вимірювання основних характеристик ЛЧМ-автодина, включаючи рівень паразитної амплітудної модуля-

ції (ПАМ), за умов варіації частоти модуляції та різних видів модулюючих сигналів. Оброблення перетвореного сигналу та виділення інформації про об'єкт здійснювалися в блоці обробки сигналів, реалізованому на базі налагоджувальних плат виробництва фірми Analog Device і плати керування АЦП, за допомогою комп'ютера AD Control board BRD3. Керування параметрами оцифрування сигналів, обчислення та спостереження спектрів сигналів здійснювалося за допомогою програмного забезпечення, яке постачається разом з налагоджувальними платами.

Дослідження показали [2–4], що застосування цифрових методів оброблення сигналів значно розширює можливості щодо реєстрації та аналізу вихідних сигналів автодинних приймально-передавальних пристроїв (ППП). Однак для застосування таких методів у малогабаритних автодинних датчиках та радіолокаторах потрібна розробка спеціалізованих цифрових систем формування та оброблення сигналів.

На цей час у зв'язку зі значним зростанням можливостей мікропроцесорних пристроїв стало актуальним завдання їх застосування для поліпшення характеристик автодинних СБРЛ. Високопродуктивні обчислювачі сучасних сигнальних процесорів здатні виконати не тільки внутрішньосхемну цифрову фільтрацію і спектральну обробку сигналу автодинного відгуку, а й частотну корекцію перестроювальної характеристики генератора.

1. Застосування цифрового сигнального процесора (ЦСП) для формування сигналу в автодинній СБРЛ з ЛЧМ

Як було продемонстровано у [1], ширина спектра сигналу автодинного відгуку від одиночного відбивача залежить від лінійності форми зондувального радіоімпульсу. Оптимальними є сигнали із мінімальними рівнями нелінійності закону модуляції. Однак це не завжди вдається реалізувати на практиці, оскільки перестроювальні характеристики генераторів на діодах Ганна, які найчастіше застосовуються в автодинних та гомодинних СБРЛ, мають нелінійну залежність частоти від керуючої напруги. Як наслідок, на практиці спостерігається розширення («розповзання» на кілька комірок Фур'є) спектра сигналу автодинного відгуку від одиночного відбивача та зни-

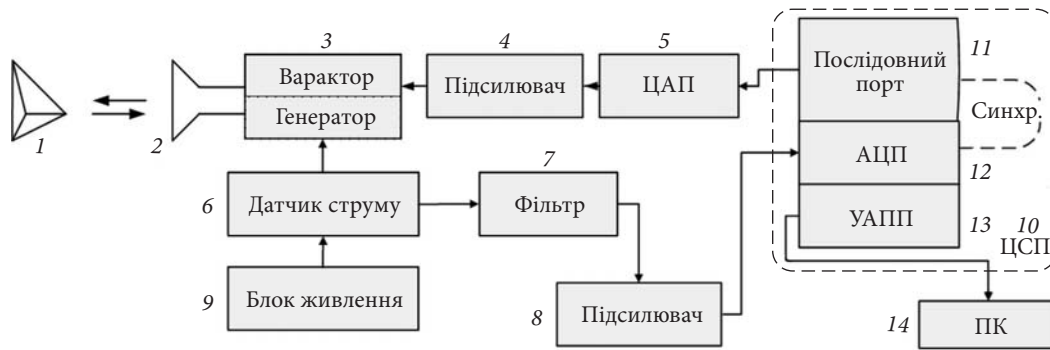


Рис. 1. Структурна схема автодинної СБРЛ з ЛЧМ

ження потужності сигналу автодинного відгуку на частоті, що відповідає заданій дальності. Зниження потужності спектра сигналу у відповідній комірці Фур'є призводить до зменшення роздільної здатності автодинної РЛС і знижує рівень співвідношення сигнал/шум прийнятого сигналу автодинного відгуку.

Відомий алгоритм роботи ЛЧМ-радіолокаторів передбачає випромінювання у вільний простір широкопasmового сигналу з ЛЧМ. Традиційно такий вид модуляції формували за допомогою різних аналогових схем, наприклад за допомогою LC-генераторів, однак такий спосіб формування ЛЧМ-сигналів має вкрай обмежені можливості корекції форми генерованого імпульсу.

Один із напрямів розроблення прецизійних СБРЛ пов'язаний із компенсацією відхилень параметрів модуляції за допомогою лінії затримки, що імітує об'єкт локації на заданій відстані [5]. Однак застосування лінії затримки значно ускладнює приймально-передавальний модуль СБРЛ і зводить до мінімуму основну перевагу автодинних систем — конструктивну простоту.

Проблему лінеаризації характеристики перестроювання частоти НВЧ-генераторів на діодах Ганна із ЛЧМ нам вдалося вирішити за допомогою методу квазістатичної корекції модуляційної характеристики без втрати переваг автодинного принципу побудови. У роботі наведено результати дослідження можливості застосування ЦСП для формування, корекції нелінійності характеристики перестроювання частоти та оброблення сигналу в автодинній СБРЛ, структурну схему якої показано на рис. 1.

До складу автодинної СБРЛ входять: 1 — кутиковий відбивач; 2 — антенна система, що викона-

на у вигляді рупорно-лінзової антени; 3 — автогенератор на діоді Ганна і варактор; 4 — підсилювач; 5 — цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП); 6 — датчик струму в колі живлення генератора; 7 — смуговий фільтр низької частоти (ФНЧ); 8 — підсилювач різницевої частоти; 9 — блок живлення; 10 — цифровий сигнальний процесор (ЦСП). До складу ЦСП входять комунікаційний послідовний порт 11, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 12 та універсальний асинхронний приймач-передавач (УАПП) 13, який можна підключити до персонального комп'ютера (ПК) 14.

У процесі формування зондувального імпульсу шляхом перестроювання керуючої напруги на варакторі з використанням ЦСП проблему нелінійності перестроювання частоти вдається вирішити за допомогою квазістатичної корекції зондувального імпульсу. Цей підхід полягає у формуванні за допомогою ЦСП керуючої напруги на варакторі за спеціально підібраним законом $V_{corr}(t)$, за якого характеристика перестроювання частоти $F(V_{corr}(t))$ є строго лінійною функцією від часу t :

$$V_{corr}(t) = F_{ideal}^{-1}(F(V(t))),$$

де F_{ideal}^{-1} — функція, що є оберненою до строго лінійної «ідеальної» (бажаної) перестроювальної характеристики.

На практиці функцію $V_{corr}(t)$ легко знайти графічно або за допомогою поліноміального наближення, використовуючи табличні значення функцій $V(t)$ і $F(V)$ у вузлах заданої сітки.

Наприклад, на рис. 2, а наведено графік перестроювальної характеристики генератора 8-мм діапазону на діоді Ганна $F(V)$. Коригуючу функ-

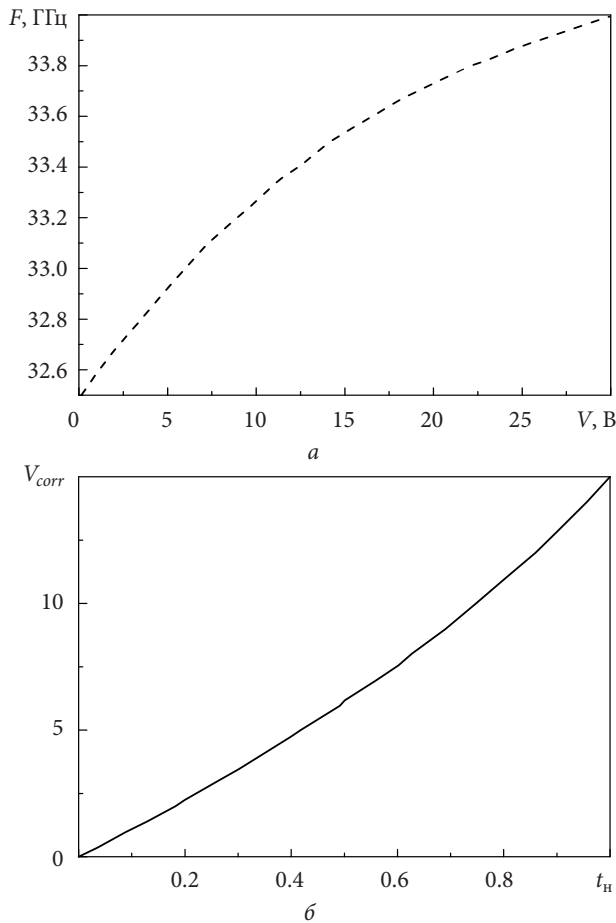


Рис. 2. Перестроювальна характеристика генератора на діоді Ганна (а) та залежність керуючої напруги на варакторі як функція нормованого часу t_n при квазістатичній корекції модуляційної характеристики (б)

цію $V_{corr}(t_n)$ нормованого часу t_n цієї характеристики подано на рис. 2, б.

Реалізацію коригуючої функції $V_{corr}(t_n)$ було здійснено шляхом цифрового синтезу необхідної залежності керуючої напруги за сформованою таблицею значень. Більш детально цей процес можна описати в такий спосіб. На етапі виготовлення радіолокаційного датчика, відповідно до характеристик генератора, генерується таблиця цифрових кодів, яка записується в постійний запам'ятовуючий пристрій радіолокаційного датчика. У процесі роботи ЦСП обирає з таблиці, що зберігається в його незалежній пам'яті, черговий цифровий код і відправляє його по шині SPI до ЦАП, який встановлює на своєму аналоговому виході відповідну напругу. Напруга з виходу ЦАП подається на смуговий підсилювач та ФНЧ, де сигнал фільтрується.

Слід зазначити, що сформований «сходинок» сигнал $U_{DCFM}(t) = U_{CFM}(t) + U_{SC}(t)$ (рис. 3), крім бажаної складової $U_{CFM}(t)$, містить також паразитну складову $U_{SC}(t)$, викликану періодичністю роботи ЦАП. Якщо швидкодія та розрядність («бітність») ЦАП досить високі, паразитна складова сигналу $U_{SC}(t)$, яка пов'язана з наявністю «сходинок», матиме малу амплітуду та високу частоту і може бути легко відфільтрована ФНЧ для невисоких порядків. У нашому випадку для отримання прийнятної лінійності було достатньо застосування фільтра 3-го порядку.

Відфільтрований сигнал подається на варактор. Напруга на варакторі визначає миттєве значення частоти сигналу, випромінюваного генератором.

2. Цифрова обробка сигналів автодинної СБРЛ із ЛЧМ

Радіосигнал із ЛЧМ, процес формування якого був описаний у попередньому розділі, випромінюється антеною у вільний простір. Випромінений сигнал, що відбивається від об'єкта, повертається через антенну систему в генератор і викликає в ньому автодинний ефект — зміну амплітуди та частоти коливань, а також струму в колі живлення генератора. Автодинний ефект, який виникає в генераторі, реєструється датчиком струму (рис. 1), що вимірює струм у колі живлення генератора на діоді Ганна. Це так звана схема «внутрішнього детектування» автодинного ефекту [6]. За допомогою датчика струму відгук генератора в колі живлення перетворюється на автодинний сигнал, який поряд з корисною складовою містить також складову ПАМ коливань генератора (див. перший і другий доданки в рівнянні 14 у [1]). За реальних умов ПАМ створює серйозні проблеми для досягнення граничних технічних параметрів автодинних локаторів із ЛЧМ. Зокрема, рівень складової ПАМ може значно перевищувати «корисні» автодинні зміни параметрів автоколивань генератора, що значно звуужує динамічний діапазон сигналу, ускладнює виділення його корисних складових і, отже, його оброблення. У нашому випадку фільтрація ПАМ здійснювалася за допомогою смугового фільтра, який був розташований після датчика струму (див. рис. 1).

Оброблення сигналу автодинного відгуку проводилося у ЦСП, алгоритм роботи обчислюваль-

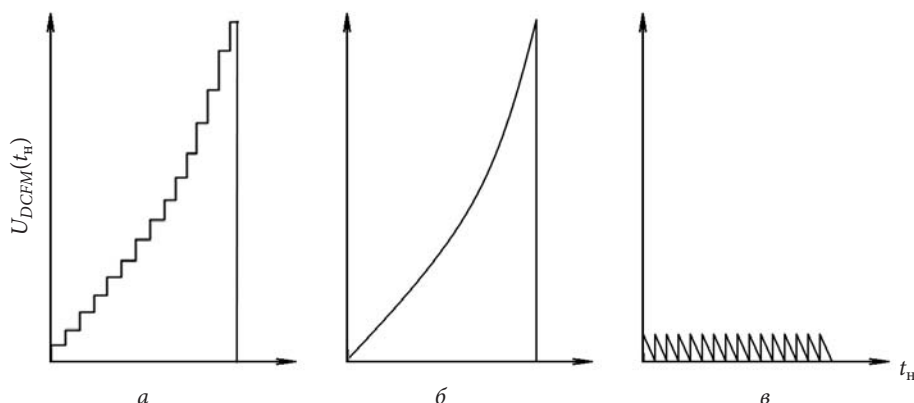


Рис. 3. Графіки ступінчастого сигналу $U_{DCFМ}(t_n)$ на виході ЦАП (а), сигналу модуляції $U_{CFМ}(t_n)$ після фільтрації завад (б) та паразитної складової $U_{SC}(t_n)$ завад (в)

ного ядра якого можна описати таким чином. Перш за все відбувається ініціалізація системи, яка включає в себе налаштування периферійних пристроїв ЦСП, розподіл внутрішньої пам'яті, установлення значень внутрішніх змінних, копіювання виконуваних інструкцій з постійного запам'ятовуючого пристрою до швидкого оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП). На наступному етапі алгоритму роботи обчислювального ядра установлюється значення пилкоподібної напруги шляхом передачі до ЦАП цифрового коду. Синхронно з установленням напруги на ЦАП здійснюють вибірку з АЦП (оцифрування вхідного сигналу) з подальшим збереженням результату в ОЗП. Послідовно повторюючи наведені вище кроки, у пам'яті ЦСП формують масив даних, який є оцифрованим сигналом автодинного відгуку.

Накопичений масив даних піддається цифровій фільтрації шляхом застосування фільтра верхніх частот з кінцевою імпульсною характеристикою, що покращує характеристики сигналу, дозволяє знизити вплив ПАМ та низькочастотних шумів. Потім сигнал передається в програмний модуль швидкого перетворення Фур'є для обчислення його спектральних складових. Для оцінки отриманого результату аналізують спектр сигналу, візуалізований на моніторі у вигляді діаграм.

3. Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження особливостей формування та оброблення автодинних сигналів

із широкою смугою ЛЧМ проводилися з експериментальним зразком автодинної СБРЛ [7, 8], структурну схему якої наведено на рис. 1.

Автодинний НВЧ-модуль датчика побудований на основі діода Ганна AA727A та варактора 3A637A-6 у корпусному виконанні. Вихідна потужність випромінювання становить 25 мВт, центральна частота 36.5 ГГц. Надвисокочастотний модуль забезпечує в режимі ЛЧМ перестроювання смуги частоти до 500 МГц. Закон ЛЧМ — несиметричний пилкоподібний, частота модуляції 10 кГц.

Метою експериментів було дослідження точності вимірювання переміщення відбивача і роздільної здатності за дальністю автодинного датчика з цифровою обробкою сигналу при широкій смузі перестроювання частоти до 500 МГц.

У першій групі дослідів проводилися вимірювання сигналу, який відбивався від рухомого короткозамикаючого поршня, розташованого у хвилевідному тракті, з'єднаному з НВЧ-виходом автодинного датчика. На рис. 4 наведені спектральні діаграми нормованих сигналів автодинного відгуку (А), які відповідають трьом положенням рухомого короткозамикача у хвилевідному тракті. Як випливає з результатів вимірювань, автодинний датчик дозволяє реєструвати переміщення відбивача з похибкою $\pm 0,3$ м. Слід зазначити, що досягнута точність вимірювання відповідає теоретичним розрахункам точності гомодинних ЛЧМ-радарів зі смугою перестроювання частоти 500 МГц.

У другій групі дослідів проводилися вимірювання роздільної здатності за дальністю авто-

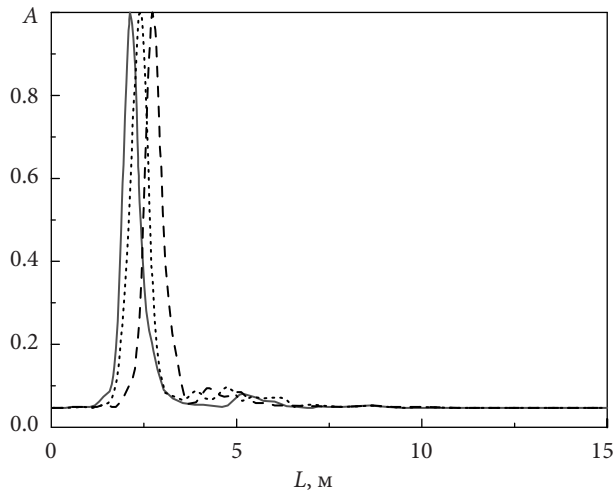


Рис. 4. Нормовані спектри сигналів відгуку, які відповідають трьом положенням короткозамикача зі зміщенням 0.3 м за відстанню (L)

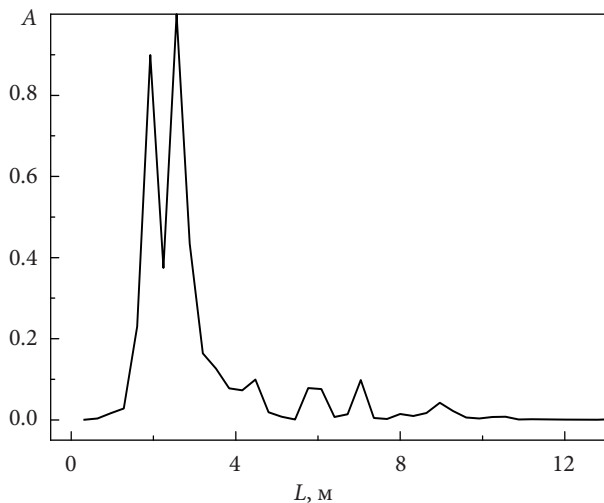


Рис. 5. Нормований спектр вихідного сигналу локатора при відбитті від двох близько розташованих відбивачів з різними коефіцієнтами відбиття

динного датчика. До НВЧ-виходу радіолокатора підключалася рупорна антена, а два кутикових відбивачі розташовувалися вздовж траси поширення сигналу. На рис. 5 наведені спектрограми сигналів автодинного відгуку від двох відбивачів, розташованих на мінімальній реестрованій відстані. Амплітуда автодинного відгуку для різних кутикових відбивачів має різні значення, оскільки ближчий відбивач має менший коефіцієнт відбиття. Згідно з результатами вимірювань, роздільна здатність за дальністю автодинного радіолокатора зі смугою перестроювання частоти 500 МГц становила 0,6 м.

Як видно з рис. 4 та 5, у спектрограмах вихідних сигналів автодинного датчика відсутні компоненти, що пов'язані з сигналом модуляції автогенератора та ПАМ. Таким чином, експериментально показано, що застосування цифрової обробки та формування сигналу модуляції частоти генератора дозволяє вирішити задачу досягнення високої роздільної здатності при вимірюванні дальності в автодинних приймально-передавальних системах.

Висновки

У роботі розглянуто особливості формування та оброблення сигналів автодинних твердотільних приймально-передавальних систем із широкою смугою ЛЧМ. На основі математичної моделі автодинного генератора з варакторним перестроюванням частоти побудовано спектри сигналу автодинного відгуку для різних відстаней до об'єкта-відбивача і амплітуд модулюючої напруги на варакторі, а також досліджено вплив нелінійності модуляційної характеристики автогенератора на спектр сигналу автодинного відгуку.

Показано, що за нелінійного характеру залежності частоти генератора від напруги на варакторі відбувається розширення спектра сигналу автодинного відгуку. Збільшення відстані до об'єкта призводить до зміщення частоти сигналу автодинного відгуку у бік більш високих частот.

Побудовано схему лінеаризації перестроювальної характеристики шляхом квазістатичної корекції керуючої напруги на варакторі. Запропоновано підхід до формування нелінійної характеристики із використанням цифрового сигнального процесора. Знайдено закон зміни коригувальної керуючої напруги як функції часу для автодинного приймально-передавального модуля 8-мм діапазону з лінійною модуляцією частоти на основі діода Ганна.

Експериментально показано, що застосування цифрової обробки та формування сигналу модуляції частоти генератора дозволило вирішити задачу досягнення високої роздільної здатності при вимірюванні відстані в автодинних СБРЛ з ЛЧМ.

Отримані у роботі результати аналізу спектра сигналів розвивають і доповнюють дані робіт [8–11] стосовно врахування нелінійності модуляційної характеристики у процесі розрахунку автодинного відгуку генератора.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Єрмак Г.П., Васильєв О.С., Варавін А.В., Балабан М.В., Фатєєв О.В., Желтов В.М. Особливості формування та обробки сигналів автодинного радіолокатора з широкою смугою модуляції частоти. Ч. 1. Моделювання режимів роботи автодина з частотною модуляцією з урахуванням нелінійності модуляційної характеристики. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27, № 1. С. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.01.053>.
2. Votoropin S.D., Noskov V.Y., Smolskiy S.M. An analysis of the autodyne effect of oscillators with linear frequency modulation. *Russ. Phys. J.* 2008. Vol. 51, No. 6. P. 610–618. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-008-9083-5>.
3. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009. № 3. С. 3–50.
4. Носков В.Я., Варавин А.В., Васильев А.С., Єрмак Г.П., Закарлюк Н.М., Ігнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 3. С. 32–86.
5. Комаров В.М., Плохих А.П., Андреева Т.М. Радиолокационные измерители высоты и наклонной дальности с непрерывным частотно-модулированным излучением. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1991. № 12. С. 52–70.
6. Носков В.Я. Регистрация автодинного сигнала в цепи питания СВЧ генераторов на полупроводниковых диодах. *Радиопромышленность*: сб. науч. тр. 1993. № 5–6. С. 28–32.
7. Varavin A.V., Ermak G.P., Vasilev A.S., Popov I.V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010. Vol. 69, Iss. 5. P. 451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
8. Ermak G.P., Vasilev A.S., Varavin A.V., Popov I.V., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012. Vol. 71, Iss. 6. P. 567–580.
9. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, Iss. 17. P. 1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.
10. Noskov V.Y., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.V., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.* 2016. Iss. 67. P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
11. Носков В.Я., Васильев А.С., Єрмак Г.П., Ігнатков К.А., Чупахин А.П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2017. Т. 60. № 3. С. 154–165. DOI: 10.20535/S0021347017030049.

Стаття надійшла 15.12.2021

REFERENCES

1. Ermak, G.P., Vasilev, O.S., Varavin, A.V., Balaban, M.V., Fateev, O.V., Zheltov, V.M., 2022. Features of the formation and processing of signals from an autodyne radar with a wide frequency modulation band. Part. 1. Modeling the operating modes of an autodyne with frequency modulation taking into account the nonlinearity of the modulation characteristic. *Radio Phys. Radio Astron.*, 27(1), pp. 53–63 (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.01.053>.
2. Votoropin, S.D., Noskov, V.Y., Smolskiy, S.M., 2008. An analysis of the autodyne effect of oscillators with linear frequency modulation. *Russ. Phys. J.*, 51(6), pp. 610–618. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-008-9083-5>.
3. Votoropin, S.D., Noskov, V.Y., Smolskiy, S.M., 2009. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Part 5. Frequency Modulated Autodyne Studies. *Uspekhi Sovr. Radioelektr.*, 3, pp. 3–50 (in Russian).
4. Noskov, V.Ya., Varavin, A.V., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Zakarlyuk, N.M., Ignatkov, K.A., Smolskiy, S.M., 2016. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Part 9. Autodyne Radar Applications. *Uspekhi Sovr. Radioelektr.*, 3, pp. 32–86 (in Russian).
5. Komarov, V.M., Plokhikh, A.P., Andreeva, T.M., 1991. Radar height and inclined range meters with continuous frequency-modulated radiation. *Zarubejnaya radioelektronika*, 12, pp. 52–70 (in Russian).
6. Noskov, V.Ya., 1993. Registration of an autodyne signal in the power supply circuit of microwave generators based on semiconductor diodes. In: *Radiopromyshlennost'*, № 5–6, pp. 28–32 (in Russian).
7. Varavin, A.V., Ermak, G.P., Vasilev, A.S., Popov, I.V., 2010. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*, 69(5), pp. 451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
8. Ermak, G.P., Vasilev, A.S., Varavin, A.V., Popov, I.V., Noskov, V.Ya., Ignatkov, K.A., 2012. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications. *Telecommunications and Radio Engineering*, 71(6), pp. 567–580.
9. Noskov, V.Ya., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M., 2016. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*, 75(17), pp. 1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.

10. Noskov, V.Y., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.V., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M., 2016. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, 67, pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
11. Noskov, V.Ya., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., 2017. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation. *Radioelectron. Commun. Syst.*, 60(3), pp. 123–131 (in Russian). DOI: 10.20535/S0021347017030049.

Received 15.12.2021

G.P. Ermak, O.S. Vasilev, A.V. Varavin, M.V. Balaban, O.V. Fateev, V.M. Zheltov

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU

12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

E-mail: ermak@ire.kharkov.ua

SIGNAL FORMATION AND PROCESSING FEATURES
FROM AUTODYNE RADAR WITH A WIDE FREQUENCY MODULATION BAND
Part II. Increasing the Resolution of Autodyne Radar
by Quasi-Static Correction of the Probe Pulse

Subject and Purpose. Proceeding from a mathematical model of the electronically tunable autodyne oscillator (Part I of this paper), essential features of the signal formation/signal processing procedure are considered, as implementable in an autodyne radar that may reveal nonlinearity in its modulation characteristic. The work is aimed at suggesting a digital technique to enable introduction of corrections to the frequency modulation law of the sounding signal and effectuate processing of the data from the close-range autodyne radar (improving its spatial resolution and accuracy of target range measurements).

Methods and Methodology. The present analysis of the radiated signal formation and processing of the data from the autodyne radar has been carried out as numerical modeling of spectral, frequency and amplitude characteristics of the radar signals expected, as well as spectral processing of the experimental data from the frequency modulated autodyne radar.

Results. An effective law of temporal variations has been suggested for the corrective control voltage of the Gunn diode-based Ka-band autodyne transceiver with a linear law of frequency modulation. The correspondent experimental studies were conducted with an autodyne close-range radar system of Ka-band employing an asymmetric linear frequency modulation with a 500 MHz band of frequency tuning. The use of digital methods for correcting the frequency modulation law has permitted improving the accuracy of target ranging and range resolution up to $0.3 \div 0.6$ m, which figures correspond to the theoretical limit for the close-range homodyne radar with a 500 MHz tuning band.

Conclusion. By linearizing the modulation characteristic of the oscillator and applying digital processing to the autodyne signal in the close-range radar system with a linear frequency modulation law it proves possible to reach ultimately high estimates for the accuracy and resolution of target range measurements. The results obtained can be helpful for developing radar sensors and radio-frequency meters with enhanced parameters and characteristics.

Keywords: *autodyne, autodyne signal, frequency modulation, non-linearity of modulation characteristic, close-range radar, Gunn-diode oscillator.*