

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ОСПЧУК АЛІНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 621.396.62 (043)

**СТІЙКІ ЗАВАДОЗАХИЩЕНІ МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ
ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ
В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Прокопенко Ігор Григорович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри телекомунікаційних та
радіоелектронних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Павліков Володимир Володимирович,
Національний аерокосмічний університет імені
М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут»,
проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Льницький Анатолій Іванович,
Національний технічний університет України «КПІ»
імені Ігоря Сікорського,
доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних
мереж Інституту телекомунікаційних систем.

Захист відбудеться «19» березня 2021 р. о 13⁰⁰, ауд. 6.205 на
засіданні спеціалізованої вченої ради – Д 26.062.19 в Національному
авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира
Гузара, 1.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного
авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Любомира
Гузара, 1.

Автореферат розіслано «18» лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., доцент



Р. С. Одарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена аналізу та розробці завадостійких методів оцінювання інформаційних параметрів сигналів в радіотехнічних системах.

Особлива увага приділена аналізу завадостійкості методів обробки сигналів бортових радіоприймальних пристроїв навігаційних систем у високочастотних та низькочастотних трактах в умовах дії завад.

Актуальність теми дослідження. Забезпечення високого рівня безпеки польотів літальних апаратів, підвищення економічної ефективності та зменшення негативного впливу на екологію є головними пріоритетами в напрямках розвитку авіації. Особлива роль при цьому надається інформаційно-технічному забезпеченню системи аеронавігаційного обслуговування.

Відповідно підвищуються вимоги до ефективності функціонування системи аеронавігаційного забезпечення в цілому, та засобів радіотехнічного забезпечення польотів зокрема. Окрім того, радіотехнічні системи набули широкого застосування не тільки в авіації та космонавтиці, але й в інших галузях, таких як системи управління, медицина, тощо.

Однак умови функціонування радіотехнічних систем (РТС) погіршуються у зв'язку з ускладненням електромагнітної обстановки, що пов'язано із зростанням енергетичного рівня завад, їх різновидів та кількості. Суттєве насичення ефіру електромагнітним випромінюванням обумовлено інтенсивним розвитком та впровадженням радіотехнічних засобів радіолокації, телекомунікації, радіозв'язку, телеметрії та інших.

Тому, однією із важливих проблем, що виникають на етапі створення та експлуатації радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій, є підвищення ефективності функціонування та забезпечення електромагнітної сумісності РТС, яка в свою чергу може бути досягнута за допомогою використання нових стійких завадозахищених методів оцінювання інформаційних параметрів сигналів.

Розробка теорії статистичного оцінювання параметрів в радіотехніці проводилась багатьма вченими, що висвітлено в фундаментальних теоретичних працях Ван Тріса Г., Мідлтона Д., Хьюбера П., Крамера Г., Левіна Б. Р., Тихонова В. І., Бакулева П. А., Леванона Н., Рембовського та інших. Синтез стійких методів оцінювання параметрів радіотехнічних сигналів є концептуальним напрямком підвищення точності та завадостійкості сучасних РТС. Вагомий внесок у вирішення теоретичних та практичних питань обробки сигналів та оцінювання їхніх параметрів здійснений фахівцями Національного авіаційного університету: Корнільєвим Е. А., Давлет'янцем О. І., Прокопенком І. Г., Омельчуком І. П., Чиркою Ю. Д.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні наукові результати отримано в рамках таких науково-дослідних робіт:

НДР № 43/22.01.03 «Інформаційні технології в автоматизованих комплексах зв'язку, навігації, спостереження, авіаційної безпеки та системах їх експлуатації»;

НДР № 75/22.01.03 «Інформаційні технології в системах радіотехнічного забезпечення польотів»;

НДР № 245-ДБ19 «Робастні завадостійкі та завадозахищені методи і алгоритми обробки інформаційних процесів в умовах неповної апріорної інформації».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення точнісних характеристик радіотехнічних систем шляхом впровадження нових стійких завадозахищених методів оцінювання інформаційних параметрів сигналів.

Задачі, що необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

- провести аналіз основних видів завад, що діють в радіоприймальних пристроях та методів, що використовуються для їх усунення;

- побудувати імітаційну модель інтермодуляційної завади;

- запропонувати стійкі методи оцінювання інформаційних параметрів, що дозволять покращити точність їх визначення в умовах підвищеного рівня завад;

- провести перевірку ефективності запропонованих методів шляхом комп'ютерного моделювання та розробити рекомендації щодо їх застосування при проектуванні радіотехнічних пристроїв.

Об'єкт дослідження – процес обробки даних в радіотехнічних системах.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оцінювання інформаційних параметрів сигналів в радіотехнічних системах.

Методи дослідження – методи системного аналізу, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії випадкових процесів, методів математичного моделювання, авторегресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше запропоновано модель інтермодуляційної завади імпульсного характеру, що полягає у формуванні потоку імпульсів на частоті корисного сигналу, що дозволила провести дослідження синтезованого методу оцінки фази гармонічного сигналу при дії імпульсної завади;

– вперше синтезовано робастний метод оцінки фази сигналу при дії інтермодуляційної імпульсної завади, що забезпечує надійну оцінку при високій інтенсивності завад;

– вдосконалено частотний детектор, що ґрунтується на методі оцінювання частоти на основі авторегресійної моделі, що дозволило підвищити швидкодію та завадостійкість при дії імпульсних завад.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування імітаційної моделі інтермодуляційної завади, імпульсної завади дозволило провести дослідження існуючих та запропонованих методів оцінювання

інформаційних параметрів в приймальних трактах радіотехнічних пристроїв та оцінити їх завадостійкість.

Отримані результати моделювання дають підставу розгляду можливості впровадження запропонованих методів оцінювання фази та частоти гармонічних сигналів в радіотехнічних системах з метою забезпечення вимог до технічних характеристик при значно гірших умовах їх функціонування.

На основі запропонованих завадозахищених методів розроблено рекомендації щодо побудови структур фазового детектору та частотного детектору та їх застосуванні при проектуванні радіотехнічних пристроїв, а також в фазових демодуляторах цифрових телекомунікаційних засобів для зменшення коефіцієнта бітової помилки.

Розроблені математичні моделі завад та сигналів використовуються в навчальному процесі при викладанні таких дисциплін «Статистична обробка сигналів», «Приймання та оброблення сигналів».

Отримані результати досліджень застосовані при виконанні кафедральних науково-дослідних робіт, що підтверджено відповідними Актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

Частина отриманих результатів виконана у співавторстві з науковим керівником та іншими співавторами. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить: аналіз завад, розробка методу оцінювання фази гармонічного сигналу при дії завад та проведення його моделювання, формулювання висновків по отриманих результатах [1, 7, 8], аналіз методів виявлення, проведення моделювання розглянутих методів [2, 5], аналіз причин виникнення інтермодуляційних завад, розробка та проведення моделювання методу оцінювання фази гармонічного сигналу при дії інтермодуляційної завади завад, сформульовано висновки отриманих результатів [3, 4, 24], постановка проблеми, аналіз завадової ситуації, розробка та моделювання методу оцінки інформативного параметру глибини модуляції навігаційних сигналів [6, 9], розробка математичної моделі сигналу радіотехнічної навігаційно-посадкової системи, розробка методу оцінювання інформаційного параметру сигналу та проведення його дослідження [10], аналіз завадової ситуації, розрахунок параметрів навігаційно-посадкової апаратури [11-17, 21, 23], проведення моделювання методу оцінювання частоти гармонічного сигналу при дії гаусівської завади [25], опис принципу роботи структурної схеми [26-28].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати, отримані автором, доповідались на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2009» (Київ, 2009 р.), Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2016 р.),

IEEE Third International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” (Київ, 2015 р.), Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2018 р.), 9-th International Conference “Advanced Computer Information Technologies” (Чеське Будйовице, Чехія, 2019 р.), 1st International Workshop on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Київ, 2019 р.), 4-th International Conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (Одеса, 2019), 9-th Microwave and Radar Week, Signal Processing Workshop 2020 (Warsaw, 2020), 2nd International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Kyiv–Lviv, 2020).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 28 друкованих роботах: з них 12 у фахових періодичних наукових виданнях (1 з яких індексується наукометричними базами Scopus та/або Web of Science), в 2 монографіях, опублікованих в Німеччині, 3 патентах та 11 в матеріалах наукових конференцій (7 індексуються наукометричною базою Scopus).

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 164 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями та 23 рисунками. Список використаних джерел містить 87 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність наукової задачі, викладено зв'язок з науковими темами, сформульовано мету та завдання дослідження, показано наукову новизну і практичне значення, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі здійснено огляд проблем, що присутні в радіотехнічних та телекомунікаційних системах і пов'язані зі зростанням рівня завад та впливом на їх роботу. Особлива увага приділена проблемам їхньої завадозахищеності та електромагнітної сумісності. Високий рівень шумів та завад спричиняє хибне детектування сигналу і в певних випадках ці помилки неможливо усунути. Тому одним з критеріїв завадостійкості системи є мінімально допустиме відношення сигнал-завада, за якого можливо виявляти сигнал, забезпечуючи необхідне значення ймовірності появи помилки. Обмежена смуга частот та неможливість підвищення потужності сигналу також обмежують ефективність системи, тому одним з напрямів сучасної науки є пошук методів, за допомогою яких можливо покращити якість приймання та оброблення радіотехнічних сигналів при високих рівнях завад. Одними з таких методів є використання в приймальних пристроях сучасних підходів до реалізації цифрової обробки на основі стійких алгоритмів оцінювання інформаційних параметрів.

У **другому розділі** розглянуто основні типи завад, що перешкоджають нормальній роботі радіотехнічних систем в цілому, та для радіоприймальних пристроїв зокрема.

Показано, що найбільшу небезпеку несуть немодульовані завади (НМЗ), завади перехресної модуляції (ЗПМ) та інtermодуляційні завади (ІМЗ). На прикладі бортової апаратури систем навігації та посадки до радіоприймальних пристроїв в частині завадостійкості до вказаних типів завад наведені вимоги у відповідності з рекомендаціями міжнародних документів “ARINC” та “НЛГС-3”.

На рис. 1. представлено рівні заважаючих сигналів у графічному вигляді з розрахунком їхніх можливих частот виникнення.

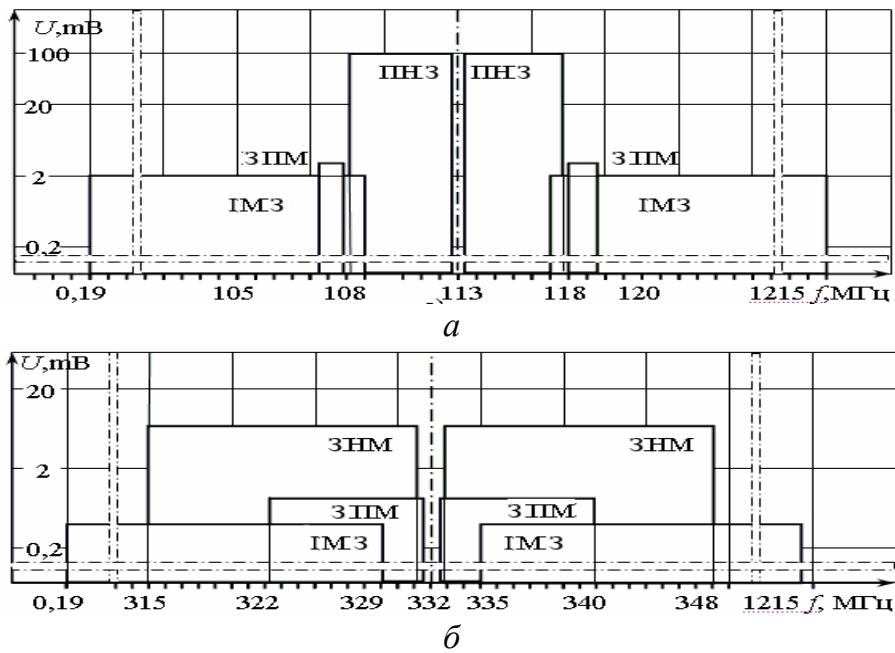


Рис. 1. Рівні завад та їх частотний розподіл: *а* для курсового приймача; *б* для глісадного приймача, де ІМЗ - інtermодуляційна завада, ПНЗ - перехресна завада, НМЗ - немодульована завада

У зв'язку з тим, що такі негативні явища, як явища блокування, перехресної модуляції та інtermодуляції, в приймачах характерні не тільки для навігаційних радіотехнічних систем, але і для приймальних пристроїв, що використовуються в інших сферах, наприклад, у телекомунікаційних системах, системах супутникового зв'язку, тощо, поставлено завдання пошуку та дослідження методів оцінювання параметрів сигналів, що характеризуються стабільністю та достатньою точністю, зокрема, оцінки фази гармонічного сигналу під дією вищезазначених завад.

У **третьому розділі** розглядається вплив нелінійності та динамічного діапазону приймального тракту на характеристики її електромагнітної сумісності. Представлена функціональна модель приймального тракту, яка відображає вплив завад на ймовірність прийому та ураження та характер зміни статистичного критерію ймовірності прийому. Встановлено, що для оптимізації характеристик приймального тракту доцільним є метод

структурного синтезу підсилювальних трактів. Також розглядається вплив радіотехнічних та індустріальних завод на характеристики точності бортової радіоелектронної апаратури. Показана методика проведення дослідження впливу завод на приймальний пристрій. Завадостійкість та електромагнітна сумісність радіотехнічних систем розглядається на прикладі апаратури навігації та посадки VOR-85 та ILS-85 та проводиться аналіз основних причин виникнення небажаних явищ, що впливають на нормальну роботу вказаних систем. Встановлено, що основний вплив на завадостійкість приймачів вносять вхідні високочастотні модулі апаратури та антено-фідерний пристрій. Особливу небезпеку несуть сигнали УКХ-ЧМ радіостанцій, комбінації частот яких призводять до виникнення інтермодуляційної завади і у випадку неприйняття спеціальних мір по захисту призводить до ураження значної кількості робочих каналів посадки та навігації.

Підвищення завадостійкості вирішується схемотехнічними засобами, що потребують зміни принципальних схем у ВЧ трактах.

Показано, що при проектуванні та модернізації РЕО, що експлуатується, необхідно застосовувати статистичні підходи. В результаті проведеного аналізу було встановлено: а) більшість підходів до оцінювання інформаційних параметрів здійснюється з припущенням про гаусівський розподіл завади; б) багато завод, що проявляються в радіоприймальних пристроях носять негаусівський характер, при чому мають широкий спектр та імпульсний характер появи; в) відповідно класичні методи оцінювання параметрів сигналів є неефективними до таких завод.

Розробці та дослідженню методів оцінювання інформаційних параметрів сигналів в радіотехнічних системах на тлі гаусівських і негаусівських завод присвячений **четвертий розділ**. Спочатку розглядається задача оцінювання на основі статистичних методів та проведено дослідження на прикладі оцінювання фази φ гармонічного сигналу $S(t_i) = U \cos(\omega_0 t_i + \varphi)$ на тлі гаусівської завади η_i . Синтез алгоритму обробки ґрунтується на статистичному підході до оцінювання за допомогою методу максимальної правдоподібності. Для вирішення поставленої задачі прийнято амплітуду сигналу U , частоту ω_0 , дисперсію гаусівської завади σ^2 відомими, а оцінка фази суміші знаходиться по вибірці значень (x_1, \dots, x_n) .

При цьому функцію правдоподібності можна записати як

$$f(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^n} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n (x_i - U \cos(\omega_0 t_i + \varphi))^2 / 2\sigma^2\right\} \quad (1)$$

для якої рівняння правдоподібності матиме вигляд

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \ln f(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n / \varphi, U, \omega_0) = \frac{U}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n [x_i - U \cos(\omega_0 t_i + \varphi)] \sin(\omega_0 t_i + \varphi) = 0 \quad (2)$$

Вирішивши дане рівняння методом Ньютона-Рафсона, отримано оцінку фази у наступному вигляді

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - \frac{\sum_{i=1}^n [x_i - U \cos(\omega_0 t_i + \varphi_k)] \sin(\omega_0 t_i + \varphi_k)}{\sum_{i=1}^n [x_i \cos(\omega_0 t_i + \varphi_k)] - U \cos(2(\omega_0 t_i + \varphi_k))} \quad (3)$$

Використавши даний метод оцінювання фази гармонічного сигналу для реалізації цифрового фазового детектору в низькочастотному тракці радіоприймального пристрою бортової апаратури системи ближньої навігації VOR, де інформаційним параметром є різниця фаз сигналів опорної та змінної фази, були отримані наступні результати, що представлені на рис. 2.

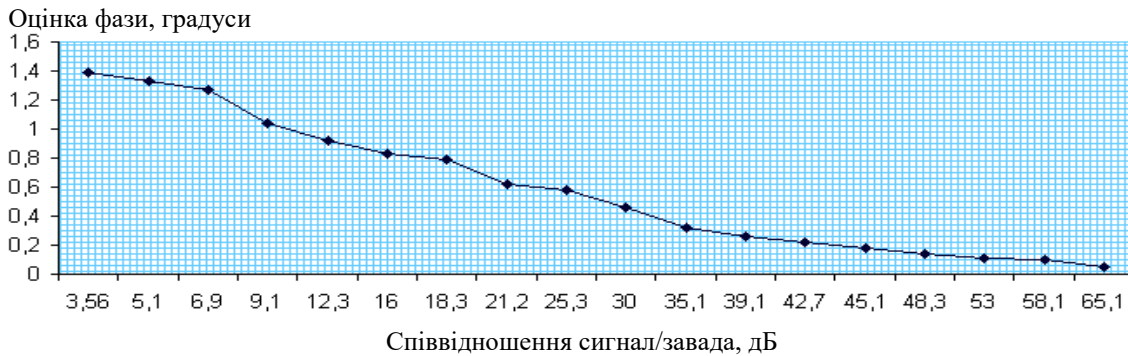


Рис. 2. Залежність похибки вимірювання фази від співвідношення сигнал/завада для вибірки об'ємом 256 відліків

Також була розглянута можливість реалізації розглянутого алгоритму оцінювання фази з метою апробації результатів математичного моделювання.

На підставі отриманих рішень, що підтвердили ефективність запропонованого методу оцінки на основі методу максимальної правдоподібності (рис. 2) було поставлено нову задачу знаходження фази гармонічного сигналу на фоні негаусівської завади, що спричинена явищем інтермодуляції в прийमाхах. Для вирішення даного завдання розроблено імітаційну модель інтермодуляційної імпульсної завади η_i , що з'являється випадково на частоті близькій до частоти корисного гармонічного сигналу та сформовано досліджувану вибірку у вигляді

$$x_i = b \cdot \cos(\omega t_i + \varphi) + \eta_i, \quad i = \overline{(1, n)}.$$

Результати моделювання інтермодуляційної завади, корисного сигналу та суміші корисного сигналу та завади проведені в середовищі Matlab та показано на рис. 3.

Отриманий випадковий процес описано за допомогою авторегресійного процесу, послідовність імпульсів якого представляється як

$$\eta_i = \sum_j^k a_j \eta_{i-j} + \xi_i,$$

де $a_j, j = \overline{1, k}$ є авторегресійні коефіцієнти, ξ_i являє собою i -й незалежний імпульс випадкового процесу Лапласа.

Для даного випадкового процесу багатовимірна щільність розподілу має вигляд

$$f(x_1, \dots, x_n, \bar{\theta}) = f(x_1) \prod_{i=2}^{\min\{i-1, k\}} f(x_i | x_{i-1}, \dots, x_{i-\min\{i-1, k\}}) =$$

$$= \frac{1}{(2\lambda)^n} \exp \left\{ - \frac{|x_1| + \sum_{i=2}^n \left| x_i - \sum_{j=1}^{\min\{i-1, k\}} a_j x_{i-j} \right|}{\lambda} \right\}, \quad (4)$$

де λ - масштабний параметр розподілу Лапласа;

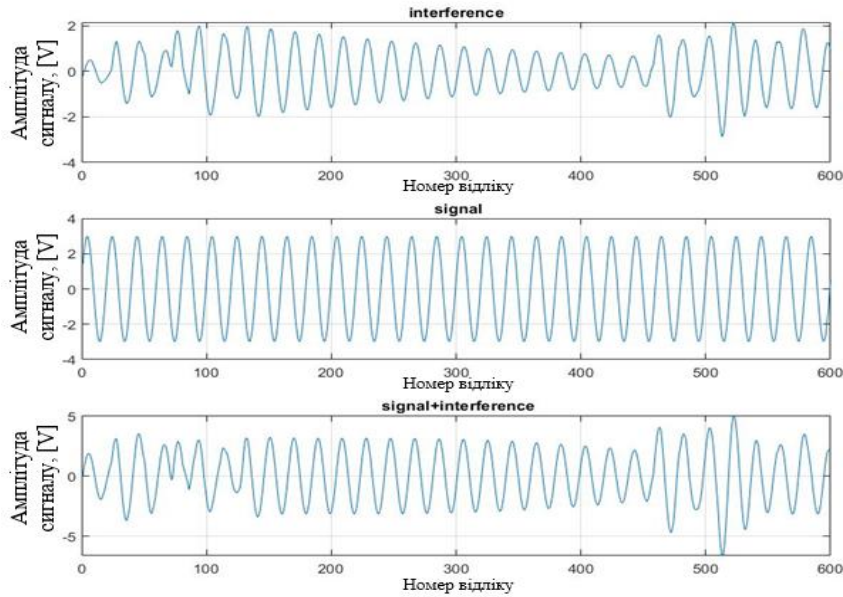


Рис. 3. Результати моделювання

На підставі виразу (4) записано рівняння правдоподібності у загальному вигляді

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{i=k+1}^n \ln f(x_i | x_{i-1}, \dots, x_{i-k}, \bar{\theta}, b) = 0, \quad j = \overline{1, k+2}$$

де $\bar{\theta} = [a_1, \dots, a_k, \lambda, \varphi]$.

Взявши тестові відліки $y_1 \dots y_i$ за відсутності сигналу ($b=0$) знайдено оцінки невідомих авторегресійних параметрів $a_1 \dots a_k$, які в подальшому використовуються для знаходження оцінки невідомої фази φ гармонічного сигналу рішенням рівнянь правдоподібності

для a_1, \dots, a_k :

$$\frac{\partial}{\partial a_j} \sum_{i=k+1}^n \ln f(y_i | y_{i-1}, \dots, y_{i-k}, \bar{\theta}, b) = 0, \quad j = \overline{1, k}$$

та для φ

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_{i=k+1}^n \ln f(x_i | x_{i-1}, \dots, x_{i-k}, \bar{\theta}, b) = 0.$$

Отримано алгоритм оцінки авторегресійних параметрів a_1, \dots, a_k , та невідомої фази φ гармонічного сигналу

$$\sum_{i=k+1}^m \text{sign} \left(y_i - \sum_{j=1}^k a_j y_{i-j} \right) y_{i-l} = 0, l = \overline{1, k}.$$

$$\sum_{i=k+1}^m \text{sign} \left(x_i - \sum_{j=1}^k a_j x_{i-j} - b(\cos(\omega t_i + \varphi)) - \sum_{j=1}^k a_j \cos(\omega t_{i-j} + \varphi) \right) \times \sum_{j=1}^k a_j \sin(\omega t_{i-j} + \varphi) = 0.$$

Також було отримано оцінку фази сигналу за методом на основі квадратурного фільтру, що широко використовується в радіотехнічних пристроях, та умовно названого класичним. Виконано порівняння результатів моделювання алгоритму оцінки запропонованим та класичним методом, що представлено на рис. 4-5.

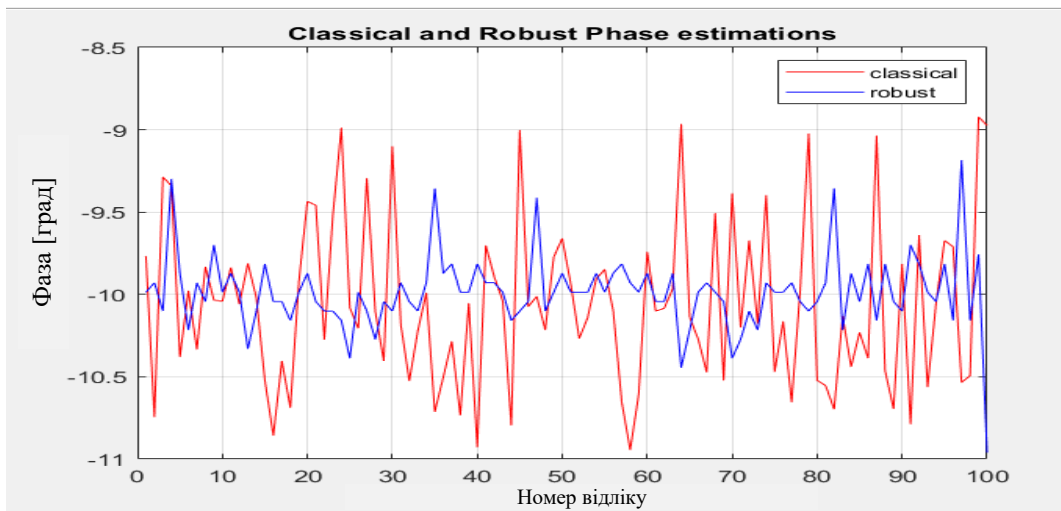
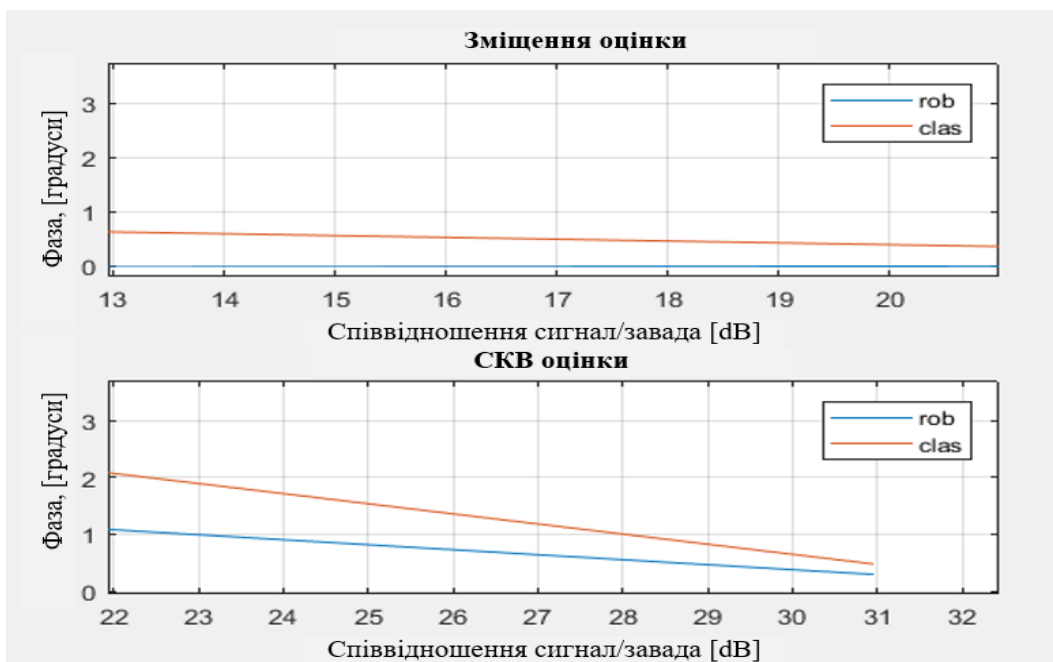
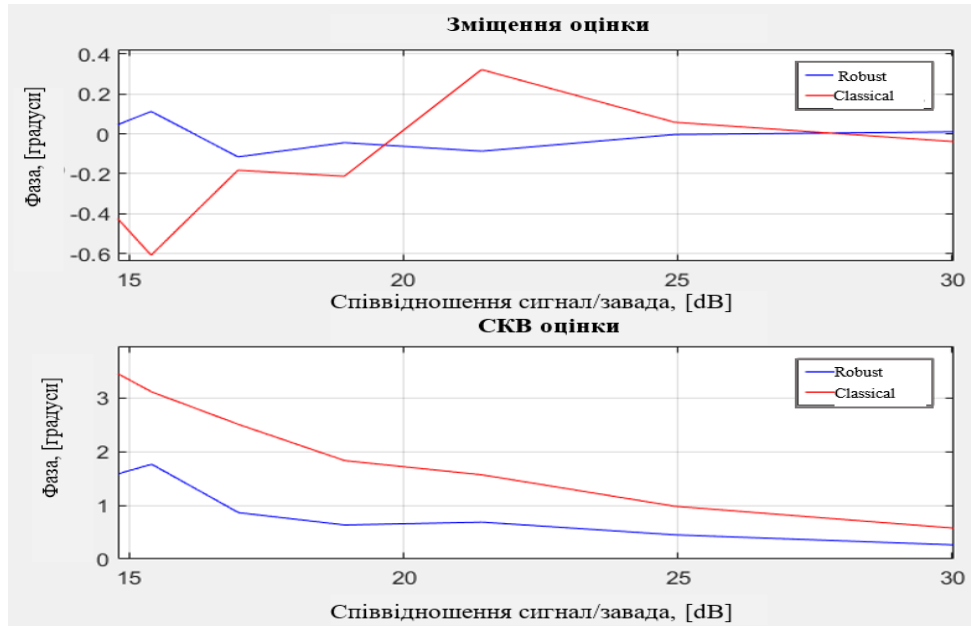


Рис. 4. Оцінка фази сигналу запропонованим (robust) та класичним методом (classical) при співвідношенні 20 дБ





б

Рис. 5. Зміщення (а) та середньоквадратичне відхилення (б) оцінки фази запропонованим та класичним методом

З отриманих результатів видно, що зміщення оцінки отриманої запропонованим методом не перевищує 0,1 градуса при співвідношенні сигнал/завада в межах 15÷25 дБ, а середньоквадратичне відхилення оцінки фази запропонованим методом в межах 17÷30 дБ не перевищує 1 градуса, в той час як оцінки класичних методом значно гірші.

Також розглядається задача знаходження оцінки фази сигналу у суміші гаусівської завади та імпульсних завад, що мають розподіл Лапласа. Для даного випадку багатовимірна щільність записана у вигляді

$$f(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n | b, \omega, \varphi, \lambda, p) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1-p}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \exp\left\{-\frac{(x_i - b \cos(\omega t_i + \varphi))^2}{2\sigma^2}\right\} + \frac{p}{2\lambda} \exp\left\{-\frac{|x_i|}{\lambda}\right\} \right], \quad (5)$$

Для даної щільності розподілу (5) складено рівняння правдоподібності. Оцінка фази гармонічного сигналу отримана методом максимальної правдоподібності у вигляді

$$\varphi^* = \arg \max_{\varphi} (f(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n | b, \omega, \varphi, \lambda, p)). \quad (6)$$

Проведено моделювання представленого алгоритму (6) та виконано порівняння з оцінками, що отримані класичним методом (за допомогою квадратурного детектора). Результати моделювання приведені на рис. 6-7, де на рис. 6 показана реалізація суміші гармонічного сигналі на тлі гаусівської шуму та імпульсних завад, а на рис. 7 – залежність зміщення та середньоквадратичне відхилення оцінок при зростанні ймовірності появи імпульсних завад.

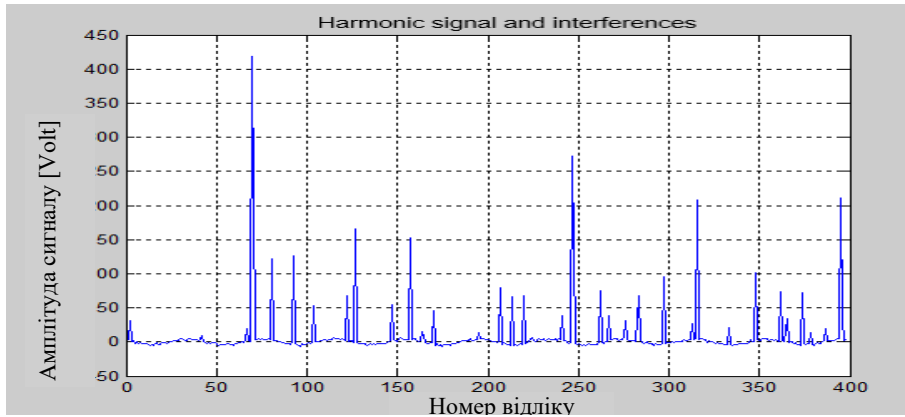
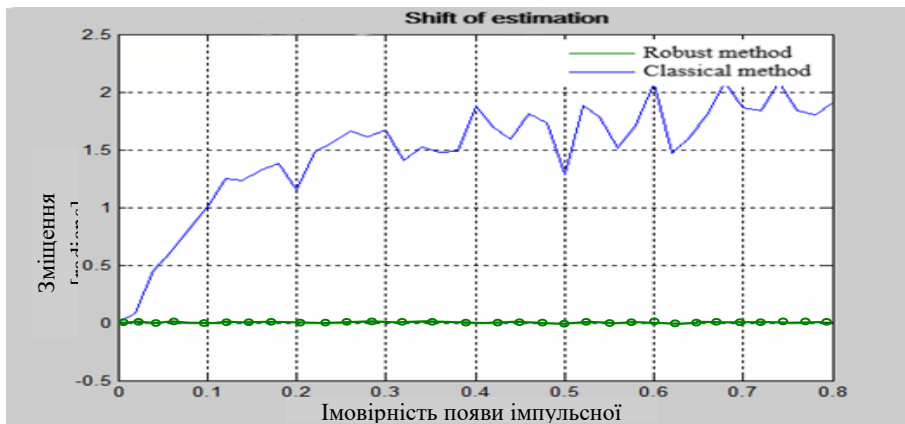
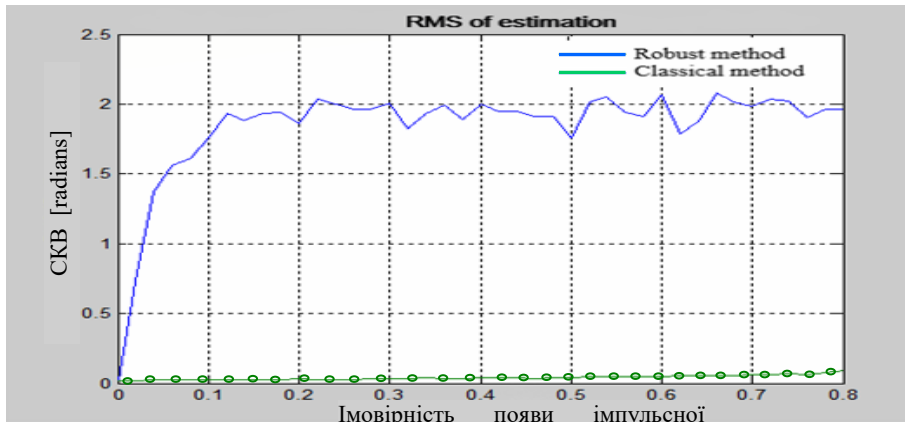


Рис. 6. Результати моделювання гармонічного сигналу на тлі гаусівської завади з дисперсією $\sigma^2 = 1$ та імпульсними завадами з ймовірністю появи $p=0.1$ та інтенсивністю $\lambda=100$



a



b

Рис. 7. Зміщення (*a*) та середньоквадратичне відхилення (*b*) оцінки фази отриманої запропонованим та класичним методами

З графіків видно, що при зростанні ймовірності появи імпульсної завади оцінка отримана запропонованим методом залишається стабільною на відміну від оцінки отриманої класичним методом.

Як зазначалося раніше, особливе значення має захищеність від шуму та завад каналів обробки сигналів у авіаційних радіотехнічних системах, зокрема у системах ближньої навігації та системах інструментальної посадки,

курсів канали яких працюють в одному й тому ж частотному діапазоні в умовах радіочастотного забруднення. Тому розглянуто задачу синтезу нового ефективного алгоритму післядетекторного обчислення різниці глибин амплітудної модуляції (РГМ) у тракці бортового радіоприймача.

Для корисного сигналу, що формується у просторі радіомаяками

$$S(t) = U_0 (1 + M_1 \cos(\Omega_1 t + \varphi_1) + M_2 \cos(\Omega_2 t + \varphi_2)) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де U_0 – амплітуда сигналу, яка залежить від точки прийому, M_1, M_2 – коефіцієнти глибини просторової модуляції, Ω_1, Ω_2 – частоти модулюючих сигналів 150 Гц та 90 Гц, φ_1, φ_2 – їхні фази; ω_0, φ_0 – частота і фаза несучої коливання.

Різниця глибини модуляції має вигляд

$$\text{РГМ} = M_1 - M_2 \quad (7)$$

Визначення РГМ проводилось з урахуванням того, що отриманий сигнал на вході радіоприймача $X(t)$ є адитивною сумішшю корисного сигналу $S(t)$ та гауссівських завад $\eta(t)$

$$X(t) = S(t) + \eta(t)$$

та потребує статистичного підходу до оцінювання.

Тому було складено функцію правдоподібності за вектором параметрів $\bar{M} = (M_1, M_2)$ та відповідно до методу максимальної правдоподібності, отримано систему рівнянь правдоподібності

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n / \bar{M}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^n} \cdot \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{x_i - S(t_i | \bar{M})}{2\sigma^2}\right\}$$

Для вирішення системи рівнянь використаний чисельний метод Ньютона-Рафсона, згідно якого ітераційні рівняння матимуть вигляд

$$M_k(j+1) = M_k(j) - \frac{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^n \{x_i - U_0 [1 + M_1 \cos(\Omega_1 t_i) + M_2 \cos(\Omega_2 t_i) \cos(\Omega_0 t_i)]\} \cdot [\cos(\Omega_1 t_i) \cdot \cos(\Omega_0 t_i)]}{\frac{\partial}{\partial M_k} \left[\sum_{i=1}^n \{x_i - U_0 [1 + M_1 \cos(\Omega_1 t_i) + M_2 \cos(\Omega_2 t_i) \cos(\Omega_0 t_i)]\} \cdot [\cos(\Omega_1 t_i) \cdot \cos(\Omega_0 t_i)] \right]_{M_k = M_k(j)}} \quad (8)$$

Перетворивши рівняння (8), отримано алгоритм оцінки РГМ

$$M_k(j+1) = M_k(j) - \frac{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^n \{x_i - U_0 [1 + M_1 \cos(\Omega_1 t_i) + M_2 \cos(\Omega_2 t_i) \cos(\Omega_0 t_i)]\} \cdot [\cos(\Omega_1 t_i) \cdot \cos(\Omega_0 t_i)]}{\sum_{i=1}^n U_0 [\cos(\Omega_k t_i) \cdot \cos(\Omega_0 t_i)]^2} \quad (9)$$

де для визначення різниці глибини модуляції (РГМ) необхідно обчислити формулу (9) для кожного коефіцієнта і визначити різницю між ними згідно (7).

Використання методу Ньютона-Рафсона для вирішення систем рівнянь у радіотехнічних задачах дозволяє отримати достатньо високу точність при оцінці інформаційних параметрів. Однак побудувати обчислювальний процес є досить трудомісткою і складною задачею. Тому

було розглянуто вирішення поставленої задачі більш простішим у технічній реалізації методом на основі перетворення Фур'є, в основі якого лежить знаходження спектру сигналу та гармонічних амплітуд, що відповідають несучій частоті Ω_0 та частотам $\Omega_0 \pm \Omega_1$, $\Omega_0 \pm \Omega_2$. Коефіцієнти глибини модуляції знаходяться з відношення амплітуд цих гармонік, а далі РГМ за виразом (7).

Результати досліджень представлені у вигляді кривих середньоквадратичного відхилення (RMS) оцінки РГМ від розміру вибірки, від співвідношення сигнал/завада $SNR = U^2/2\sigma^2$ та від значення самого параметра РГМ (криві 1 відповідають оцінкам отриманим методом максимальної правдоподібності, а криві 2 відповідають оцінкам отриманим методом з використанням перетворення Фур'є).



Рис. 8. Середньоквадратичне відхилення оцінки РГМ при зміні вибірки n



Рис. 9. Середньоквадратичне відхилення оцінки РГМ при зміні співвідношення сигнал/завада (SNR)

Як видно з рис. 9, коли SNR зменшується, оцінка РГМ незначно змінюється та на рівні 20 дБ дорівнює 0,0005, що на порядок вище допустимого значення. Таким чином, RMS оцінки РГМ становить не більше 0,0005 і, відповідно, не перевищує допустиме значення 0,002. Це дає достатній запас точності та обґрунтування для використання розглянутих методів оцінки РГМ при проектуванні та модернізації радіотехнічних систем.

Також у четвертому розділі розглядається задача робастного оцінювання миттєвої частоти гармонічного сигналу при дії імпульсних негаусівських завад і вдосконалення на її базі частотного детектора та розглянута можливість його застосування в тракці цифрової обробки на

прикладі тракту обробки цифрового сигналу в бортовому радіоприймачі системи ближньої навігації VOR.

Структурна схема запропонованого частотного детектора показана на рис. 10 та складається з аналого-цифрового перетворювача (АЦП), ковзного вікна розміром n , в якому формується пачка сигналу, оцінювача миттєвого значення частоти $\hat{\omega}$ та обчислювача миттєвої та несучої частоти – ω_0 , обчислювач різниці частот $\Delta\hat{\omega}$.



Рис. 10. Структурна схема детектора частоти на основі оцінки частоти

Проведено дослідження впливу імпульсної завади, що розподілена за законом Лапласа, на ефективність оцінки частоти частотно-модульованого сигналу. Представлено результати дослідження на рис. 11, де показано: a – модулюючий сигнал, b – оцінка частоти запропонованим частотним детектором b – оцінка частоти детектором на основі лічильника перетинів нулів.

Аналіз результатів моделювання показує суттєві переваги запропонованого детектора частоти у порівнянні з детектором на основі лічильника перетинів нулів.

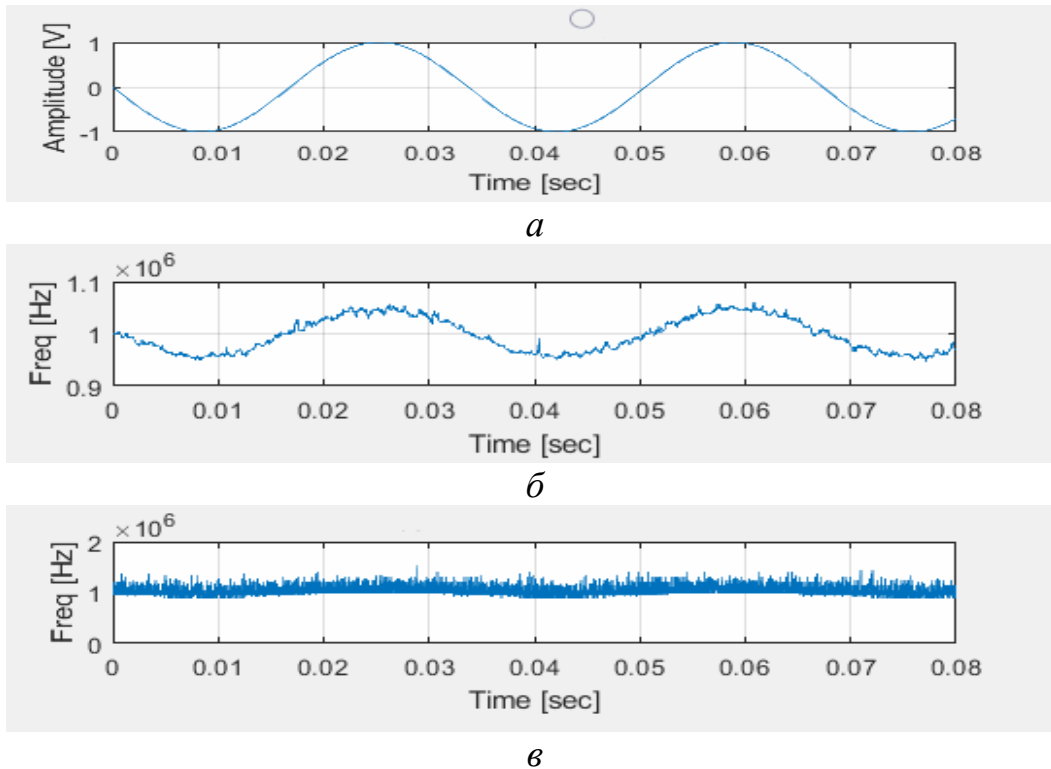


Рис. 11. Моделювання детекторів частоти на основі оцінювача частоти (b) та лічильника перетинів нулів (v) у ковзному вікні ($n = 100$) при співвідношенні сигнал/шум $SNR = 11$ dB та імпульсними завадами з параметрами: $RMS = 10$ V, ймовірність дії ХІЗ $p = 0,025$.

Результати роботи були впроваджені у навчальний процес Національного авіаційного університету.

У **додатках** наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також патент України на корисну модель.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна задача розробки завадостійких алгоритмів оцінювання інформаційних параметрів сигналів при дії високих рівнів завад, як гаусівського, так і негаусівського характеру.

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Аналіз існуючих підходів до оцінювання інформаційних параметрів в радіотехнічних системах показав що існуючі підходи не задовольняють сучасним тенденціям підвищення точності визначення інформаційних параметрів сигналів в умовах погіршення завадової ситуації.

2. На основі проведеного аналізу встановлено, що велику загрозу для радіоприймальних пристроїв несуть інтермодуляційні завади. З метою дослідження таких завад розроблено імітаційну модель інтермодуляційної завади, що несе імпульсний характер появи.

3. Синтезовано алгоритми оцінювання інформаційних параметрів сигналів у радіотехнічних системах, що дозволяють забезпечити завадостійкість радіоелектронного обладнання в умовах високого рівня завад та розглянуто можливість їх застосування на прикладі радіотехнічних систем ближньої навігації та посадки літальних апаратів.

4. Проведене математичне моделювання синтезованого алгоритму оцінки невідомої фази сигналу на основі представленої моделі інтермодуляційної завади показало перевагу запропонованих рішень у порівнянні з широко вживаним методом оцінки фази на основі квадратурного детектора.

Проведено вдосконалення частотного детектора на основі робастної оцінки частоти, що дозволяє визначати частоту сигналу в умовах появи імпульсних завад.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Prokopenko I., Omelchuk I., Osipchuk A., Petrova J. Estimation of the Harmonic Signal Parameters in the Complex Interferences. *The 9-th Microwave and Radar Week, Signal Processing Workshop 2020 (SPW2020), Warsaw, Poland, 5-7 October 2020*. P. 2227. (*Scopus*)

2. Prokopenko I., Osipchuk A., Petrova J. Estimation of the harmonic signal phase under action of intermodulation interference in radio navigation and landing systems. *Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of 9th International Conference, Ceske Budejovice (Czech Republic), 5-7 June, 2019*. P. 137-140. (*Scopus*)

3. Prokopenko I., Omelchuk I., Osipchuk A., Petrova J. Robust estimation of the harmonic signal parameters in non-gaussian interferences. *The 4-th International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics, Odessa, 9-13 September 2019*. P. 32-37. (*Scopus*)

4. Prokopenko I., Prokopenko K., Omelchuk I., Osipchuk A. Synthesis and effectivity analysis of robust algorithms for random signal detection in non-gaussian interferences. *Electronics and Control Systems*. 2019. Volume 3, No. 61. P. 9-17.

5. Prokopenko, I., Omelchuk, I., Osipchuk, A., Daradkeh, Y. I. (2019). Estimations of the signal information parameters in radio engineering systems. CEUR Workshop Proceedings, 2588. P. 107-120. (*Scopus*)

6. Прокопенко І.Г., Осіпчук А.О., Нечаєв Ю.В., Щербаков С.Д. Цифрова обробка сигналів навігаційних радіомаяків VOR в бортових авіаційних прийомних пристроях. *Електроніка та системи управління*. 2006. № 4. С. 59-65.

7. Прокопенко І.Г., Осіпчук А.О., Нечаєв Ю.В., Щербаков С.Д. Аналіз точності методів вимірювання різниці фаз сигналів. *Авіа-2006*, Київ. 25-27 вересня 2006. С. 23.44-23.47.

8. Прокопенко І.Г., Осіпчук А.О., Нечаєв Ю.В., Щербаков С.Д. Алгоритми оцінки коефіцієнта модуляції сигналів радіомаяків в навігаційно-посадочних системах. *Електроніка та системи управління*. 2008. № 4. С. 48-53.

9. Прокопенко І.Г., Осіпчук А.О. Застосування перетворення Фур'є при оцінюванні параметрів сигналів в радіотехнічних навігаційних системах. *Теорія та методи обробки сигналів*, Київ. 20-22 травня 2008. С. 107.

10. Кондрашов В.И., Форостян В.Ю., Осіпчук А.О. Характеристики радиочастотных трактов бортового авиационного навигационно-посадочного оборудования. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2009. № 10. С. 56-67. (*Scopus*)

11. Кондрашов В.И., Форостян В.Ю., Осіпчук А.О. Влияние радиотехнических и промышленных помех на точностные характеристики авиационной навигационно-посадочной радиоаппаратуры. *Електроніка та системи управління*. 2009. № 3 (21). С. 87-92.

12. Кондрашов В.И., Ильченко М.Н., Осіпчук А.О. Пути повышения безопасности навигационно-посадочных операций воздушных судов. *Електроніка та системи управління*. 2009. № 3. С. 80-86.

13. Кондрашов В.И., Музыченко В.Н., Осіпчук А.О. Влияние нелинейности и динамического диапазона приемного тракта бортовой навигационно-посадочной аппаратуры на характеристики ее электромагнитной совместимости. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. №4. С. 5661.

14. Кондрашов В.И., Ильченко М.Н., Бейгель М.И., Осіпчук А.О. Модернизация бортовых приемников сигналов систем посадки и навигации самолетов. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. № 4. С. 62-68.

15. Кондрашов В.И., Осіпчук А.О. Сигналы и помехи в бортовых навигационно-посадочных радиоприемных устройствах. *Авіа-2009*, Київ. 21-23 вересня 2009. С. 56.

16. Кондрашов Я.В., Осіпчук А.О. Характеристики активних антен бортової авіаційної навігаційно-посадкової апаратури. *Наукоємні технології*. 2013. Т.19. № 3(19). С. 313-316.

17. Osipchuk A. The complex navigation and landing equipment for a "small aviation". *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments: 2th International conference*, Kyiv. 15-17 October 2013. P. 104-107. (*Scopus*)

18. Osipchuk A. Integration of unified modules of aircraft onboard navigation and landing equipment for "small aviation". *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments: 2th International conference*, Kyiv. 15-17 October 2013. P. 107 – 110. (*Scopus*)

19. Osipchuk A. Principles of creation unified base complex of navigation and landing equipment. *Electronics and Control Systems*. 2013. № 3(37). P. 94-98.

20. Кондрашов В.І., Осіпчук А.О., Фіалкіна Т.С. Навигационно-посадочное авиаоборудование. Базовый ряд бортовых радиотехнических навигационно-посадочных средств летательных аппаратов. Palmarium Academic Publishing, 2013. 185 с.

21. Petrova Yu., Osipchuk A., Fialkina T. Mobile multi-position air-navigation-landing system and its parameters in landing mode. Proceedings of the National Aviation University. 2020. № 83(2). P. 27-36.

22. Osipchuk A. Radio multiposition system for UAV navigation and landing. *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments: 3th International conference*, Kyiv. 15-17 October 2015 P. 257-260. (*Scopus*)

23. Кондрашов В.І., Осіпчук А.О., Фіалкіна Т.С. Параметры навигационной авиасистемы. Характеристики мобильной радиодальномерной навигационно-посадочной авиасистемы многопозиционного наземного базирования. *Palmarium Academic Publishing*. 2016. 80 с.

24. Прокопенко І.Г., Осіпчук А.О. Робастний алгоритм оцінки фази гармонічного сигналу на тлі гаусівського шуму та імпульсної завади. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*. 21-23 листопада 2016. С. 68.

25. Мігель С.В., Осіпчук А.О. Дослідження комбінованого алгоритму оцінювання частоти радіосигналу в суміші з гаусівською завадою. *Політ. Сучасні проблеми науки*. 3–6 квітня 2018. С. 55-56.

26. Кондрашов В.І., Кондрашов Я.В., Осіпчук А.О., Фіалкіна Т.С. Радіоприймач сигналів інструментальної посадки: пат. 88168 Україна, МПК Н04В 1/06 (2006.01) G01S 5/02 (2010.01), № у 2013 06503; заявл. 27.05.2013; опубл. 11.03.14, Бюл. № 5.

27. Кондрашов В.І., Кондрашов Я.В., Осіпчук А.О., Фіалкіна Т.С. Радіоприймач сигналів всенаправленого маяка фазової системи ближньої навігації: пат. 98730 Україна, МПК Н04В 1/06 (2006.01) G01S 5/02 (2010.01), № у 2014 10957; заявл. 07.10.2014; опубл. 12.05.15, Бюл. № 9.

28. Кондрашов В.І., Кондрашов Я.В., Осіпчук А.О., Фіалкіна Т.С., Туренко Д.М. Цифровий вимірювач різниці фаз: пат. 98229 Україна, МПК G01R 25/08 (2006.01) № у 2014 10955, заявл. 07.10.2014, опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

АНОТАЦІЯ

Осіпчук А.О. Стійкі завадозахищені методи та алгоритми оцінювання інформаційних параметрів сигналів в радіотехнічних системах – Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

У роботі було проведено аналіз існуючих методів оцінювання інформаційних параметрів сигналів у радіотехнічних системах з метою визначення перспективних напрямків їх розвитку та вдосконалення в умовах ускладнення електромагнітної обстановки. Також було розглянуто основні фактори, що впливають на завадостійкість та електромагнітну сумісність радіотехнічних систем. Основну увагу в роботі приділено розробці нових алгоритмів оцінювання інформаційних параметрів сигналів при дії як гаусівських так і негаусівських завад. Розроблено імітаційну модель інтермодуляційної завади, що проявляється у радіоприймачах та веде до погіршення їх роботи.

Синтезовано алгоритм оцінювання фази гармонічного сигналу при дії інтермодуляційної завади та проведено дослідження запропонованого методу шляхом математичного моделювання.

Також розглянуто можливість вдосконалення частотного детектору на основі методу оцінки частоти та проведено його дослідження при дії імпульсних завад на тлі гаусівського шуму.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час розробки та вдосконалення радіотехнічних систем, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: радіотехнічна система, оцінювання параметрів сигналу, оцінка фази, імпульсна завада, статистична обробка сигналів, частотний детектор.

АННОТАЦІЯ

Осипчук А.А. Устойчивые помехозащищенные методы и алгоритмы оценивания информационных параметров сигналов в радиотехнических системах – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

В работе был проведен анализ методов оценки информационных параметров сигналов в радиотехнических системах с целью определения перспективных направлений их развития и совершенствования в условиях осложнения электромагнитной обстановки. Также были рассмотрены основные факторы, влияющие на помехоустойчивость и электромагнитную совместимость радиотехнических систем. Основное внимание в работе уделено разработке новых алгоритмов оценивания информационных параметров сигналов при воздействии как гауссовских так и негауссовских помех. Разработана имитационная модель интермодуляционных помех, которые возникают в приемных устройствах радиотехнических систем и ведут к ухудшению их работы.

Синтезирован алгоритм оценки фазы гармонического сигнала при воздействии интермодуляционных помех и проведено исследование предложенного метода путем математического моделирования.

Также рассмотрена возможность совершенствования частотного детектора на основе метода оценки частоты и проведено его исследование при воздействии импульсных помех на фоне гауссовского шума.

Полученные научные результаты целесообразно использовать при разработке и совершенствовании радиотехнических систем, а также в учебном процессе.

Ключевые слова: радиотехническая система, оценки параметров сигнала, оценка фазы, импульсная помеха, статистическая обработка сигналов, частотный детектор.

ABSTRACT

Osipchuk A.A. Robust noise immunity methods and algorithms for estimation of information signal parameters in radio engineering systems – As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.13 – «Radio devices and means of telecommunications». – National Aviation University, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the analysis and development of interference immunity methods of estimation of information parameters signals of in radio engineering systems.

Particular attention is paid to the analysis of interference immunity of signal processing methods of onboard radio receiving devices of navigation systems in high-frequency and low-frequency paths in the conditions of interference.

In the work, an analysis was made of existing methods for evaluating the information parameters of signals in radio systems in order to identify promising directions for their development and improvement in conditions of complication of the electromagnetic environment. The main factors affecting the noise immunity and electromagnetic compatibility of radio systems were also considered.

The main attention is paid to the processing of signals in radio engineering systems based on a statistical approach, namely the development of new algorithms for evaluating the information parameters of signals under the influence of both Gaussian and non-Gaussian interference.

Based on the analysis, it was found that intermodulation interference poses a major threat to radio receivers. Such interferences are characteristic not only for radio engineering systems, but also for satellite communication systems, telecommunication systems of wireless communication. To study such interference, a simulation model of the intermodulation interference, which has an impulse character, was developed.

An algorithm for estimating the phase of a harmonic signal under the action of an intermodulation interference is synthesized and a study of the proposed method by mathematical modeling is performed.

The possibility of improving the frequency detector on the basis of the frequency estimation method is also considered and its research under the action of pulse interference against the background of Gaussian noise is carried out.

The obtained scientific results should be used during the development and improvement of radio systems, as well as in the educational process.

Keywords: radio engineering system, estimation of signal parameters, phase estimation, impulse noise, statistical signal processing, frequency detector.

Підп. до друку 17.02.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 19-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002