



Г. А. Плехова¹, М. В. Костікова², С. М. Неронов³, Б. С. Карпішен⁴,
С. О. Кашкевич⁵, Ю. О. Ковтунов⁶

¹ХНАДУ, м. Харків, Україна, plehovaanna1@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-6912-6520

²ХНАДУ, м. Харків, Україна, kmv_topaz@ukr.net, ORCID iD: 0000-0001-5197-7389

³ХНАДУ, м. Харків, Україна, sernikner@gmail.com, ORCID iD: 0000-0003-2381-1271

⁴ХНАДУ, м. Харків, Україна, karpishen.bogdan@gmail.com, ORCID iD: 0009-0001-1790-9048

⁵НАУ, м. Київ, Україна, svitlana.kashkevych@npp.nau.edu.ua, ORCID iD: 0000-0002-4448-3839

⁶ВІТВ НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, juri.kovtunov@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-2708-115X

СИСТЕМА З МНОЖИНОЮ ВХОДІВ ТА МНОЖИНОЮ ВИХОДІВ (МІМО) ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ

У роботі запропоновано систему з множиною входів та множиною виходів (МІМО) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією. Запропонована система характеризується тим, що приймальна частина системи прийомопередавача безпілотного літального апарату додатково містить блок регуляризації, причому вихід модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату з'єднано з першим входом блоку регуляризації, перший вихід блоку регуляризації з'єднано з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату, а другий вихід блоку регуляризації з'єднано з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату. Технічним результатом є підвищення завадозахищеності та швидкості передачі інформації каналів управління та передачі даних безпілотних літальних апаратів, а як наслідок підвищення стійкості функціонування прийомопередавачів безпілотних літальних апаратів.

БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, МОДЕЛЬ, СИСТЕМА, РЕГУЛЯРИЗАТОР, ZERO FORCING, ЕФЕКТИВНІСТЬ

G. A. Pliekhova, M. V. Kostikova, S. M. Neronov, B. S. Karpishen, S. O. Kashkevych, Yu. O. Kovtunov. A multiple-input-multiple-output (MIMO) system for unmanned aerial vehicles with regularization. The paper proposes a system with multiple inputs and multiple outputs (MIMO) for unmanned aerial vehicles with regularization. The proposed system is characterized by the fact that the receiving part of the transceiver system of the unmanned aerial vehicle additionally contains a regularization block, and the output of the channel state evaluation module of the receiving part of the transceiver of the unmanned aerial vehicle is connected to the first input of the regularization block, the first output of the regularization unit is connected to the input of the demodulator of the first channel of the receiving part of the transceiver of the unmanned aerial vehicle, and the second output of the regularization unit is connected to the input of the demodulator of the second channel of the receiving part of the transceiver of the unmanned aerial vehicle. The technical result is an increase in immunity and the speed of information transmission of the control and data transmission channels of unmanned aerial vehicles, and as a result, an increase in the stability of the operation of the transceivers of unmanned aerial vehicles.

UAVS, MODEL, SYSTEM, REGULATOR, ZERO FORCING, EFFICIENCY

Вступ

Сучасну армію неможливо уявити без безпілотних літальних апаратів, адже вони вказують на ціль, наводять артилерію, коригують вогонь, передають розвіддані прямо до штабу військової частини або підрозділу, якій виконує бойове завдання, а головне – бережуть життя бійців. Під час проведення бойових дій безпілотні літальні апарати входять до найважливіших потреб для українських сил безпеки та сил оборони, зокрема Збройних Сил, поліції, Нацгвардії, Служби безпеки й Держприкордонслужби. Тому гостро стоїть питання підвищення стійкості функціонування безпілотних літальних апаратів.

Запропонована модель відноситься до галузі інформаційних систем спеціального призначення, зокрема, до спеціальних інформаційних систем, а саме, до систем передачі даних за допомогою засобів радіозв'язку безпілотних літальних апаратів, що

використовують антенну систему з багатьма входами та багатьма виходами (МІМО – Multiple Input Multiple Output).

Виклад основного матеріалу

Відомий регуляризатор що містить блок побудови сімейства зворотних операторів, блок розрахунку помилок вихідних даних та блок формування результатів розрахунків, причому вихід блоку побудови сімейства зворотних операторів послідовно з'єднано з входом блоку розрахунку помилок вихідних даних, вихід якого послідовно з'єднано з входом блоку формування результатів розрахунків [1].

В даному регуляризаторі, коефіцієнт регуляризації визначається відношенням кількості приймальних антен до поточного значення відношення сигнал/шум за умов наявності псевдостационарного каналу зв'язку.

До недоліків відомого регуляризатора, який обрано за аналог, відноситься суттєва залежність від параметрів стану каналу зв'язку, що для однорангової системи зв'язку МІМО, в якій відбувається переміщення засобів радіозв'язку з МІМО одне відносно іншого, відбувається суттєве збільшення помилок приймання інформації, та зменшення швидкості передачі інформації за рахунок збільшення кількості циклів повторної передачі інформації.

Найбільш близьким технічним рішенням, обраним як прототип є система з множиною входів та множиною виходів (МІМО), що містить передавальну частину, приймальну частину, при цьому передавальна частина містить джерело даних, кодер, модулятор низької частоти, буферний пристрій, перший канал передавальної частини, другий канал передавальної частини, при цьому перший канал передавальної частини містить модулятор високої частоти (ВЧ) першого каналу передавальної частини, еквалайзер першого каналу передавальної частини, синтезатор частот першого каналу передавальної частини, а другий канал передавальної частини містить модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини, синтезатор частот другого каналу передавальної частини, еквалайзер другого каналу передавальної частини, причому вихід джерела даних з'єднано з входом кодера, вихід якого з'єднано з входом модулятора низької частоти, вихід модулятора низької частоти з'єднано з входом буферного пристрою, вихід якого з'єднаний з входом першого каналу передавальної частини та входом другого каналу передавальної частини, виходи яких з'єднані з антенними пристроями, причому еквалайзер першого каналу передавальної частини розташований у першому каналі передавальної частини та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу передавальної частини, еквалайзер другого каналу передавальної частини розташований у другому каналі передавальної частини та з'єднаний з виходом синтезатора частот другого каналу передавальної частини, приймальна частина містить перший канал приймальної частини, другий канал приймальної частини, буферний пристрій приймальної частини, перетворювач квадратур приймальної частини, декодер приймальної частини, отримувач даних, модуль оцінки стану каналу приймальної частини, при цьому перший канал приймальної частини містить демодулятор першого каналу приймальної частини, синтезатор частот першого каналу приймальної частини, еквалайзер першого каналу приймальної частини, а другий канал приймальної частини містить демодулятор другого каналу приймальної частини, еквалайзер другого каналу приймальної частини, синтезатор частот другого каналу приймальної частини, причому еквалайзер першого каналу приймальної частини розташований у першому каналі приймальної частини

та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу приймальної частини, еквалайзер другого каналу приймальної частини розміщено у другому каналі приймальної частини, та з'єднано з виходом синтезатора частот другого каналу приймальної частини, при цьому входи першого каналу приймальної частини, та другого каналу приймальної частини з'єднані з антенними пристроями, вихід першого каналу приймальної частини та вихід другого каналу приймальної частини з'єднані з входом буферного пристрою приймальної частини вихід якого з'єднаний з перетворювачем квадратур приймальної частини, вихід якого з'єднаний з входом декодера приймальної частини та з першим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини, вихід якого з'єднано з другим входом декодера приймальної частини, вихід якого з'єднано з входом отримувача даних, та другим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини [2].

Недоліком системи з множиною входів та множиною виходів (МІМО), яку обрано за прототип, є те, що у разі використання двох та більше передавальних та приймальних антен, а також у разі використання антенних решіток (АР), отримана інформація про стан каналу зв'язку, в залежності від сигнальної, завадової обстановки в каналі та самої конфігурації приймальних та передавальних антен стає погано обумовленою (виродженою) і обробка сигналів в детекторі приймача стає неможливим або призводить до отримання помилкових (неправдоподібних даних) (див. вираз 1).

$$Y = H \cdot S + \eta, \quad (1)$$

де, в матричному вигляді представлено Y – прийняті антенною системою сигнали, H – матриця стану каналу зв'язку (матриця коефіцієнтів підсилення), S – вектор переданих сигналів, η – шум системи.

В основу моделі покладено задачу шляхом додаткового введення блоку регуляризації до складу системи з множиною входів та множиною виходів (МІМО) з регуляризацією, підвищити завадозахищеність та швидкість передачі інформації каналів управління та передачі даних безпілотної літальних апаратів, а як наслідок підвищити стійкість функціонування прийомопередавачів безпілотної літальних апаратів.

Система з множиною входів та множиною виходів (МІМО) для безпілотної літальних апаратів з регуляризацією, що містить передавальну частину прийомопередавача безпілотної літального апарату, приймальну частину прийомопередавача безпілотної літального апарату. При цьому передавальна частина прийомопередавача безпілотної літального апарату містить джерело даних, кодер, модулятор низької частоти, буферний пристрій, перший канал передавальної частини, другий канал передавальної частини

демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату.

Враховуючи тактику та умови застосування безпілотних літальних апаратів з використанням багатьох антен, необхідно забезпечити роботу MIMO системи в одноранговій (децентралізованій) системі з рівними пріоритетами. Що з урахуванням умов експлуатації призводить до нестационарності каналу зв'язку і потребує удосконалення методів боротьби з поганою обумовленістю матриці стану каналу зв'язку.

Для вирішення зазначеної проблеми пропонується використовувати коефіцієнт регуляризації, оптимальне значення якого буде обчислюватись для кожної з оцінок матриці стану каналу зв'язку використовуючи метод стабілізуючого функціонала А. М. Тихонова [3].

Вектор комплексних інформаційних символів s_i , що має розмірність $N \times 1$, і при цьому символ s_i передається через i -у антену. Матриця стану каналу H є прямокутною комплексною матрицею розмірності $M \times N$. Елементи цієї матриці h_{ij} представляють собою комплексний коефіцієнт передавання між i – передавальною та j – приймальною антенами.

Для випадку короткої вибірки вхідного процесу, коли число вибірових векторів L менше за число

приймальних каналів M системи MIMO ($L < M$), час стаціонарності може виявитись недостатнім для накопичення $L \approx 2M$ вибірок вхідного процесу і в цьому випадку матриця стану каналу зв'язку H стає виродженою. Тобто матриця стану каналу зв'язку H , має лише L позитивних власних чисел, а інші $(M - L)$ власних чисел є нульовими. Наявність нульових власних чисел свідчить про те, що зворотна матриця H^{-1} – не існує. В такому разі, подальша демодуляція неможлива внаслідок необхідності обернення матриці стану каналу зв'язку H^{-1} . Тобто, ми маємо інформацію про стан каналу зв'язку лише в L – мірному просторі, а в $(M - L)$ частині простору інформація про стан каналу зв'язку відсутня.

Таким чином, для отримання необхідних даних про відсутню частину інформації необхідно використовувати апріорні дані або застосовувати методи вирішення некоректних задач (задач нестійких до похибок у вхідних даних або стійких до мультиколінеарності), найбільш відомим з таких методів є метод регуляризації А. М. Тихонова, принцип якого покладений в роботі блоку [3].

Суть моделі пояснюється за допомогою креслень, де на рис. 1 подана функціональна схема запропонованої системи.

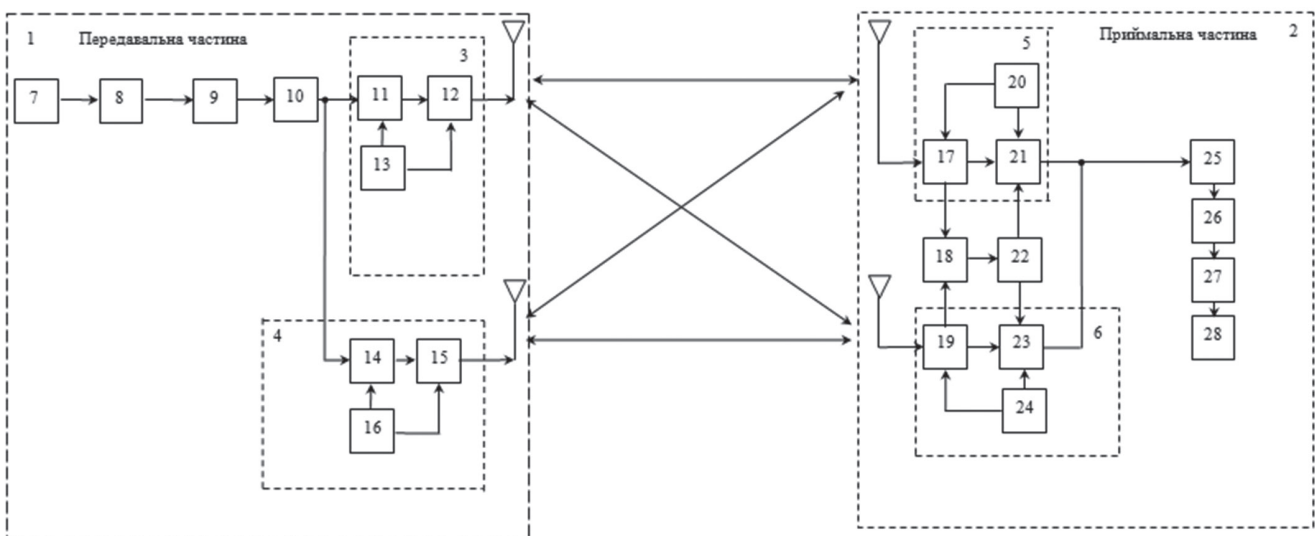


Рис. 1. Функціональна схема запропонованої системи

Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) з регуляризацією конструктивно містить (див. рис. 1) передавальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарату 1, приймальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарату 2, перший канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 3, другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 4, перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 5, другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального

апарату 6, джерело даних 7, кодер 8, модулятор низької частоти (НЧ) 9, буферний пристрій 10, модулятор ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11, еквалайзер першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 12, синтезатор частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13, модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного

літального апарату 15, синтезатор частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16, еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 17, модуль оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 18, демодулятор першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21, синтезатор частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 20, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 19, демодулятор другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23, синтезатор частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 24, буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 25, перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26, декодер приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 27 та отримувач даних 28.

Попередньо розглянемо конструкцію системи.

Передавальна частина системи МІМО для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією складається:

- джерело даних 7, що розташована в передавальній частині прийомопередавача безпілотного літального апарату з'єднано послідовно з кодером 8, який послідовно з'єднаний з модулятором низької частоти (НЧ) 9. Вихід модулятора НЧ 9 послідовно з'єднаний з буферним пристроєм 10;

- вихід буферного пристрою 10 розділено на дві частини, що з'єднано з модулятором високих частот (ВЧ) першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11 та з модулятором ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14.

Далі конструктивно передавальна частина системи МІМО для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією розподіляється на два однотипних канали, що ідентичні за функціональним призначенням та конструктивним виконанням.

Перший канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату складається з:

- вхід модулятора ВЧ першого каналу передавальної частини 11, з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13;

- виходи синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотно-

го літального апарату 13 та модулятора ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11 з'єднані з входом еквалайзера першого каналу передавальної частини 12 прийомопередавача безпілотного літального апарату.

Другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату системи МІМО з регуляризацією складається з:

- вхід модулятора ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14, з'єднаний з виходом синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16;

- виходи синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16 та модулятора ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14 з'єднані з входом еквалайзера другого каналу передавальної частини 15.

Приймальна частина системи МІМО для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією конструктивно складається з двох каналів.

Перший канал приймальної частини системи МІМО з регуляризацією конструктивно виконаний наступним чином:

- вихід еквалайзера першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 17 з'єднаний послідовно з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21;

- з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21 з'єднаний вихід синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 20, а другий вихід синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 20 з'єднаний з входом еквалайзера першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 17.

Будова та функціональне призначення другого каналу приймальної частини аналогічні першому каналу приймальної частини. Будова другого каналу приймальної частини наступна:

- вихід еквалайзера другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 19 з'єднаний послідовно з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23;

- з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23 з'єднаний вихід синтезатора частот другого каналу приймальної частини

прийомопередавача безпілотного літального апарату 24, а другий вихід синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 24 з'єднаний з входом еквалайзера другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 19.

Виходи демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21 та демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23 з'єднані з входом буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 25; вихід буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 25 послідовно з'єднаний з входом перетворювача квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26.

Перший вихід перетворювача квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26 з'єднаний з входом декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 27, а другий вихід з'єднаний з входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 18. На вхід модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 18 надходять нормовані сигнали з виходів еквалайзерів першого 17 та другого каналів 19, з виходу модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату матриця стану каналу зв'язку H надходить до блоку регуляризації 22, де здійснюється перевірка на її виродженість або погану обумовленість та у разі необхідності, обчислюється оптимальне значення коефіцієнта регуляризації по методу стабілізуючого функціонала А. М. Тихонова.

Далі оцінки стану каналу зв'язку з блоку регуляризації надходять на демодулятори першого 21 та другого 23 каналів, а також на перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26 для визначення сигнального сузір'я, яке б відповідало вхідному сигналу, на декодер приймальної частини 27 та отримує дані 28 для врахування параметрів стану каналу зв'язку.

Як зазначалося вище, методи демодуляції для систем зв'язку МІМО ґрунтуються на оберненні матриці стану каналу зв'язку. Найбільш розповсюдженими методами демодуляції для МІМО систем зв'язку є методи неортогонального просторового мультиплексування (вони забезпечують найбільшу пропускну здатність у порівнянні з методами ортогонального просторового рознесення). Найбільш розповсюдженими методами демодуляції у системах МІМО з неортогональним просторовим мультиплексуванням є

методи Zero Forcing – метод форсування нуля та метод мінімуму середньоквадратичної похибки (МСКО, або MMSE Minimum MeanSquare Error).

Zero Forcing – лінійний метод демодуляції, є найбільш простим в плані технічної реалізації, а отже і найбільш швидким. Однак у порівнянні з методом МСКО він має меншу імовірність виникнення бітових помилок (BER – bit error rate). Виходячи з особливостей методів Zero Forcing та МСКО, найбільшу цікавість становить необхідність збільшення точності (зменшення BER) найбільш швидкого методу Zero Forcing за рахунок використання регуляризації по методу А. М. Тихонова.

Суть методу Zero Forcing полягає у знаходженні у приймачі оцінок переданих символів (1) на основі обернення матриці стану каналу зв'язку H . Оцінка прийнятих символів знаходиться у відповідності до виразу [3]:

$$s^{ZF} = W_{ZF} \cdot y = (H' H)^{-1} H' (Hs + n), \quad (2)$$

де $W_{ZF} = H^+ = (H' H)^{-1} H'$ – матриця лінійного перетворення, яка являє собою псевдозворотню матрицю Мура-Пенроуза, або у випадку квадратної неособливої матриці H , $W_{ZF} = H^+ = H^{-1}$.

У випадку коли матриця стану каналу зв'язку буде виродженою, нам необхідно визначити оптимальне значення параметру регуляризації, який дозволить замінити відсутню інформацію про стан каналу зв'язку даними найбільш близькими до апріорних. Для цього вихідну систему лінійних рівнянь (1) представимо у виді

$$(H + \lambda I) \cdot s = y, \quad (3)$$

де $\lambda > 0$ – параметр регуляризації. Його оптимальне значення знаходиться з мінімізацією функціоналу А. М. Тихонова:

$$\Omega(s, \lambda) = \|H \hat{s} - y\|^2 + \lambda \|\hat{s} - s\|^2; \hat{s} = (Hs + \lambda I)^{-1} \cdot y. \quad (4)$$

Мінімізуючи функціонал $\Omega(s, \lambda)$, отримуємо регуляризоване значення $s(\lambda)$, що залежить від λ . Причому при $\lambda \approx 0$ задача близька до вихідної – некоректної, а при великих значеннях задача стає коректною, але її рішення далеко від рішення вихідної задачі (дані стають неправдоподібними). Таким чином, необхідно визначити оптимальне значення параметру регуляризації. Однак, при визначенні оптимального значення функціоналу А. М. Тихонова $\Omega(s, \lambda)$ виникає проблема виявлення глобального мінімуму при наявності локальних (рис. 2).

В такому разі найбільш ефективним є графічний аналіз даних, однак достатньо ефективним виявляється усереднення по мінімальним значенням.

Розраховане значення оптимального λ підставляємо у вираз (2) та отримуємо регуляризовану оцінку прийнятих символів демодульованих методом Zero Forcing.

$$s^{ZF} = (W_{ZF} + \lambda I) \cdot y. \quad (5)$$

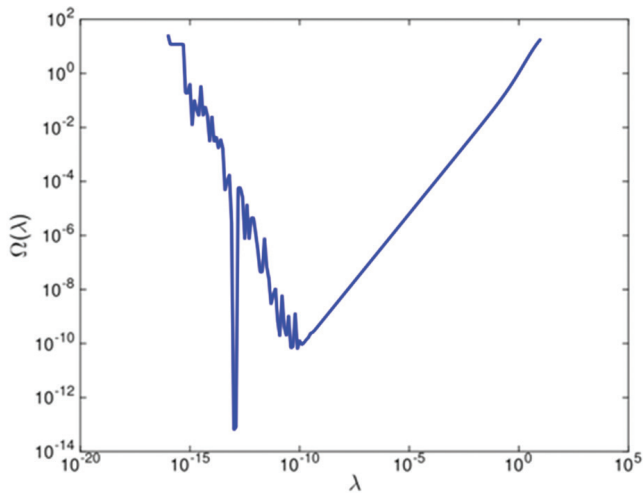


Рис. 2. Проблема виявлення глобального мінімуму

Результати моделювання системи зв'язку МІМО, в яку передається 1000 символів для кожного значення SNR, що приймає значення від 0 до 25 дБ, використовуючи 4-QAM модуляцію, антенну систему

$M = N = 2$ та 5% вироджених матриць оцінок стану каналу зв'язку, представлені на рис. 3. З рис. 3 видно, що в наслідок додаткового застосування процедури регуляризації по методу А. М. Тихонова ефективність найбільш швидкого демодулятора Zero Forcing МІМО системи підвищується за рахунок збільшення достовірності передачі інформації (зменшення BER). При цьому точність Zero Forcing демодулятора в області малих значень відношення сигнал шум наближається до більш точного, але і більш складного методу МСКО, та по відношенню до традиційного Zero Forcing, Zero Forcing з регуляризацією дозволяє забезпечити таку саму імовірність виникнення помилки (BER) при $SNR = 1$ дБ, як традиційний Zero Forcing при $SNR = 3$ дБ. Що є дуже важливим для систем зв'язку військового призначення побудованих за технологією МІМО, які мають забезпечити роботу в умовах складної радіоелектронної обстановки за рахунок найбільш швидкого алгоритму демодуляції, а отже дозволить забезпечити прийнятну достовірність передачі даних в діапазоні малих значень SNR .

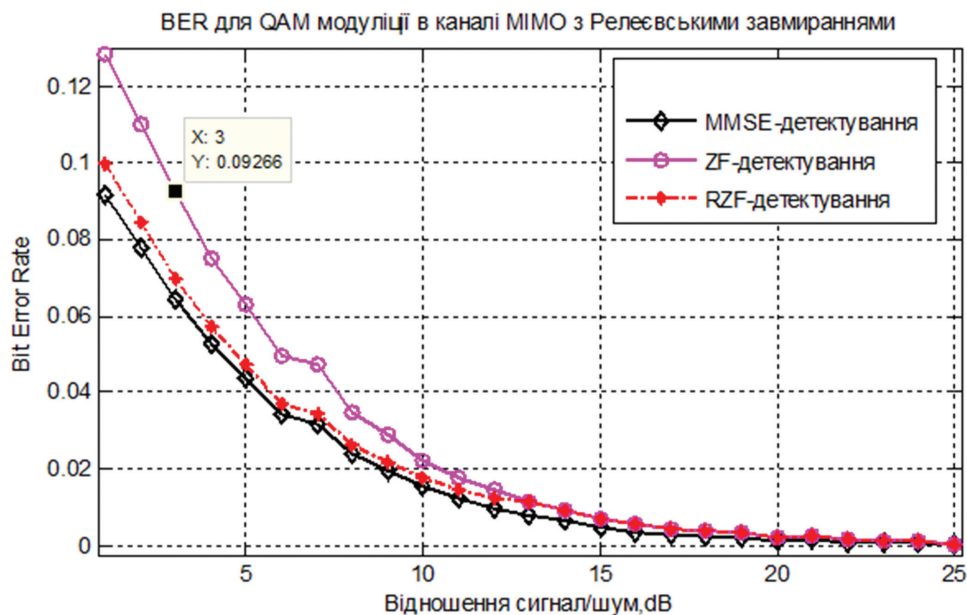


Рис. 3. Результати моделювання системи зв'язку МІМО

Система з множиною входів та множиною виходів (МІМО) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією працює наступним чином.

Для передачі інформації з передавальної частини 1 від джерела даних 7 інформація надходить на кодер 8, де послідовність вихідних символів повідомлення $U(t)$ перетворюється в послідовність символів $V(t)$, вид яких визначається обраним режимом роботи модулятора НЧ 9.

Далі сигнал з виходу модулятора НЧ 9 надходить на вхід буферного пристрою 10. Функція буферного пристрою полягає в тому, що він накопичує інформацію, яка надходить з модулятора НЧ 9 та коли

кількість інформації стає достатньою для передачі (формується кадр) – передає інформацію на вхід модулятора ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11 та на вхід модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14 для подальшої обробки. Передавальна частина конструктивно складається з двох каналів (для розглянутої нами конфігурації антенної системи $N = M = 2$, але вона може бути і іншою, в такому разі кількість передавальних та приймальних каналів прийомопередавача безпілотного літального апарату буде пропорційною обраний

антенній системі, а функціональне та конструктивне виконання каналів буде аналогічним), кадр вихідної інформації сформований буферним пристроєм 10 розпаралелюється на перший та другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату, відповідно 3 та 4, які мають однакове функціональне призначення та однакове конструктивне виконання.

На вхід модулятора ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11 надходить інформаційна послідовність з виходу синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13, який виконує функцію формування сітки високостабільних опорних частот.

З виходу синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13 надходить інформаційна послідовність на вхід еквалайзеру першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 12, що виконує функцію вибору алгоритму вирівнювання (корегування) характеристик каналу в залежності від сигнальної та завадової обстановки.

На вхід еквалайзеру першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 12 надходить інформаційна послідовність, сформована в модуляторі ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 11 та інформаційна послідовність з синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13.

Другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 4 працює аналогічно першому каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 3.

На вхід модулятора ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14 надходить інформаційна послідовність з виходу синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16, який виконує функцію формування сітки високостабільних опорних частот.

З виходу синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16 надходять інформаційна послідовність на вхід еквалайзеру другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 15, що виконує функцію вибору алгоритму вирівнювання (корегування) характеристик каналу в залежності від сигнальної та завадової обстановки.

На вхід еквалайзеру другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального

апарату 15 надходить інформаційна послідовність, сформована в модуляторі ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 14 та інформаційна послідовність з синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 16.

Інформаційна послідовність з виходу еквалайзеру першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 12 та еквалайзеру другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 15 надходять на антенні пристрої. Антенні пристрої випромінюють інформаційну послідовність через радіоканал на приймальну сторону системи.

Сигнал, що був переданий передавальною частиною системи, надходить на антенні пристрої прийомної частини системи, а саме на антенний пристрій першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 5 та антенний пристрій другого каналу прийомопередавача безпілотного літального апарату 6.

На приймальній стороні системи здійснюється послідовність (серія) зворотних перетворень інформаційної послідовності, що були здійсненні на передавальній стороні системи.

Перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 5 та другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 6 мають однакове призначення та конструктивне і функціональне виконання.

Прийнята інформаційна послідовність з виходів антенних пристроїв надходить на еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 17 та еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 19, де здійснюється операція аналізу викривлень, що утворилися в ході передачі по каналу зв'язку та визначення алгоритму корекції.

З виходів еквалайзерів першого та другого каналу, відповідно 17 та 19 інформація надходить у блок оцінки стану каналу зв'язку 18, в якому формується матриця стану каналу зв'язку — H , яка необхідна для проведення подальших детектування та демодуляції сигналів. З виходу блоку оцінки стану каналу зв'язку 18, матриця стану каналу зв'язку надходить до блоку регуляризації 22 в якому здійснюється перевірка на виродженість або погану обумовленість матриці стану каналу зв'язку і у разі необхідності приймається рішення про обчислення оптимального коефіцієнта регуляризації методом стабілізуючого функціоналу А. М. Тихонова. Обчислений у відповідності до виразу (4) коефіцієнт регуляризації використовується

для подальшого виправлення матриці стану каналу зв'язку – H , яка після виправлення надходить на демодулятори першого 21 та другого 23 каналів приймальної частини системи МІМО прийомопередавача безпілотного літального апарату.

У демодуляторі першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21 та демодуляторі другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23 при надходженні інформаційної та службової послідовності з виходу синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 20 та синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 24 відбувається виділення корисної інформаційної послідовності шляхом кореляції прийнятого сигналу з зразком сигналу, який закладений як еталон для приймання (детектування). Синтезатори частот приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 20 та 24 ідентичні за своєю будовою та функціональним призначенням синтезаторам передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 13 та 16 та на приймальній стороні виконують функцію виділення корисної послідовності з усієї послідовності, що надійшла на приймальну частину системи.

З виходу демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21 та демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23 сигнал надходить на вхід буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 25, який виконує функцію накопичення до певного рівня інформації, що надходить з виходу демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 21 та демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 23.

Після накопичення певної кількості необхідної для роботи інформації буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 25 передає накопичену інформацію на перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26, що являє собою універсальний пристрій, що використовується незалежно від виду модуляції, але з

додатковим перетворенням демодулюючого коливання. Перетворювач квадратур приймальної частини – пристрій балансного типу, що не потребує фільтрації для виділення доданої або від'ємної складової сигналу. З виходу перетворювача квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 26 сигнал надходить на вхід декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарату 27, що виконує функцію декодування інформаційної послідовності та визначення кількості бітових помилок на кожний переданий символ інформації. З виходу декодера приймальної частини 27 інформація надходить на отримувач даних 28.

Висновки

Підвищення ефективності застосування системи з множиною входів та множиною виходів (МІМО) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією, що надається, у порівнянні з прототипом, досягається за рахунок додаткового введення блоку регуляризації, що забезпечує підвищення завадозахищеності та швидкості передачі інформації каналів управління та передачі даних безпілотних літальних апаратів, а як наслідок підвищення стійкості функціонування прийомопередавачів безпілотних літальних апаратів та забезпечення меншої імовірності виникнення бітових помилок при використанні найбільш швидкого методу демодуляції Zero Forcing.

Список літератури:

- [1] Christian B. Peel, Bertrand M. Hochwald and A. Lee Swindlehurst, A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multiantenna Multiuser Communication – Part I: Channel Inversion and Regularization / IEEE Transactions on Communications, Vol. 53, No. 1, January 2005, pp. 195.
- [2] Патент України на корисну модель № 127599 «Система з множиною входів та множиною виходів (МІМО)», зареєстрований 10.08.2018, бюл. № 15.
- [3] Кашкевич С. О., Дмитрієва О. І., Троцько О. О., Шкнай О. В., Шишацький А. В. Метод самоорганізації інформаційних мереж в умовах дестабілізуючих впливів. The development of technical, agricultural and applied sciences as the main factor in improving life: collective monograph / Trembitska O., Zhuravel S., Stoliar S., Bilotserkivska L. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2024. С. 192 – 218. DOI – 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.210.

Надійшла до редколегії 30.10.2024