



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **160547** (13) **U**
(51) МПК

H04B 1/54 (2006.01)

H04B 1/56 (2006.01)

H04B 1/58 (2006.01)

H04B 3/60 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2024 05278</p> <p>(22) Дата подання заявки: 06.11.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 18.09.2025</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 17.09.2025, Бюл.№ 38</p>	<p>(72) Винахідник(и): Кашкевич Світлана Олександрівна (UA), Шишацький Андрій Володимирович (UA), Неронов Сергій Миколайович (UA), Плехова Ганна Анатоліївна (UA), Єфименко Олександр Володимирович (UA), Гурко Олександр Геннадійович (UA), Кононихін Олександр Сергійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002 (UA)</p> <p>(74) Представник: Азарова Алла Володимирівна</p>
---	---

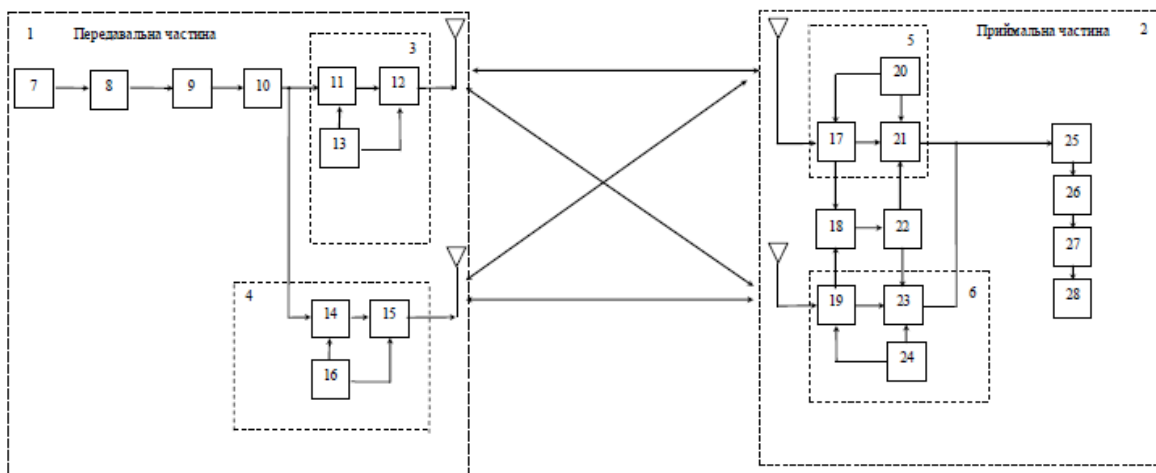
(54) СИСТЕМА З МНОЖИНОЮ ВХОДІВ ТА МНОЖИНОЮ ВИХОДІВ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ

(57) Реферат:

Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією містить передавальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата, приймальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата. Передавальна частина прийомопередавача безпілотного літального апарата містить джерело даних, кодер, модулятор низької частоти, буферний пристрій, перший канал передавальної частини, другий канал передавальної частини. Перший канал передавальної частини містить модулятор високої частоти (ВЧ) першого каналу передавальної частини, еквалайзер першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. 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 другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та виходом другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, виходи яких з'єднані з антенними пристроями. Еквалайзер першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано у першому каналі передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано

UA 160547 U

у другому каналі передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та з'єднаний з виходом синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. Приймальна частина містить перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, декодер приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, отримувач даних, модуль оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. Перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить демодулятор першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить демодулятор другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. Еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано у першому каналі приймальної частини та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розміщено у другому каналі приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, та з'єднано з виходом синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. Входи першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, та другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднані з антеними пристроями, вихід першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та вихід другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднані з входом буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата вихід якого з'єднаний з перетворювачем квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, вихід якого з'єднаний з входом декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та з першим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини, вихід якого з'єднано з другим входом декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, вихід якого з'єднано з входом отримувача даних, та другим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата. Приймальна частина системи прийомопередавача безпілотного літального апарата додатково містить блок регуляризації. Вихід модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднано з першим входом блока регуляризації, перший вихід блока регуляризації з'єднано з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий вихід блока регуляризації з'єднано з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата.



Фіг. 1

Корисна модель належить 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 (MIMO – Multiply Input Multiply Output).

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

10 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 MIMO в якій відбувається переміщення засобів радіозв'язку з MIMO одне відносно іншого, відбувається суттєве збільшення помилок приймання інформації, та зменшення швидкості передачі інформації за рахунок збільшення кількості циклів повторної передачі інформації.

Найбільш близьким аналогом є система з множиною входів та множиною виходів (MIMO), 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 розташовано у першому каналі передавальної частини та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу передавальної частини, еквалайзер другого каналу передавальної частини розташовано 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 розташовано 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].

55 Недоліком системи з множиною входів та множиною виходів (MIMO), яку обрано за найближчий аналог, є те, що у разі використання двох та більше передавальних та приймальних антен, а також у разі використання антенних решіток (AP), отримана інформація про стан каналу зв'язку, в залежності від сигнальної, заводової 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, S - вектор переданих сигналів, H - матриця стану каналу зв'язку (матриця коефіцієнтів підсилення), η - шум системи.

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

Поставлена задача вирішується тим, що система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією, що містить передавальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата, приймальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата, при цьому передавальна частина прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, 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 прийомопередавача безпілотного літального апарата та входом другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, виходи яких з'єднані з антенними пристроями, причому еквалайзер першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано у першому каналі передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано у другому каналі передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та з'єднаний з виходом синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, приймальна частина містить перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, декодер приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, отримувач даних, модуль оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, при цьому перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить демодулятор першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата містить демодулятор другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, синтезатор частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, причому еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розташовано у першому каналі приймальної частини та з'єднаний з виходом синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата розміщено у другому каналі приймальної частини

прийомопередавача безпілотного літального апарата, та з'єднано з виходом синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, при цьому входи першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, та другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднані з антенними пристроями, вихід першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата та вихід другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднані з входом буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата вихід якого з'єднаний з перетворювачем квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, вихід якого з'єднаний з першим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини, вихід якого з'єднано з другим входом декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, вихід якого з'єднано з входом отримувача даних, та другим входом модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, згідно з корисною моделлю, приймальна частина системи прийомопередавача безпілотного літального апарата додатково містить блок регуляризації, причому вихід модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата з'єднано з першим входом блока регуляризації, перший вихід блока регуляризації з'єднано з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий вихід блока регуляризації з'єднано з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата.

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.Н. Тихонова [3].

Вектор комплексних інформаційних символів S , 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 $L^2 M$ 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. Н. Тихонова, принцип якого покладений в роботі блока [3].

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

Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) з регуляризацією конструктивно містить (див. фіг. 1) передавальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата 1, приймальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата 2, перший канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 3, другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 4, перший канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 5, другий канал приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 6, джерело даних 7, кодер 8, модулятор низької частоти (НЧ) 9, буферний пристрій 10, модулятор ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 11, еквалайзер першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного

літального апарата 12, синтезатор частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 13, модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 14, еквалайзер другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 15, синтезатор частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 16, еквалайзер першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 17, блок оцінки стану каналу зв'язку 18, демодулятор першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 21, синтезатор частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 20, еквалайзер другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 19, демодулятор другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23, синтезатор частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 24, буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 25, перетворювач квадрантур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 26, декодер приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 27 та отримувач даних 28.

Конструкція запропонованої системи виглядає наступним чином:

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

– джерело даних 7, що розташована в передавальній частині прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата 11 та з модулятором ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 14.

Далі конструктивно передавальна частина системи MIMO 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 апарата складається з:

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

– виходи синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 13 та модулятора ВЧ першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 11 з'єднані з входом еквалайзера першого каналу передавальної частини 12 прийомопередавача безпілотного літального апарата;

Другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата системи MIMO з регуляризацією складається з:

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

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

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

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

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

– з входом демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 21 з'єднаний вихід синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 20, а другий вихід синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного

літального апарата 20 з'єднаний з входом еквалайзера першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 17;

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

5 – вихід еквалайзеру другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 19 з'єднаний послідовно з входом демодулятором другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23;

10 – з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23 з'єднаний вихід синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 24, а другий вихід синтезатора частот другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 24 з'єднаний з входом еквалайзеру другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 19.

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

Перший вихід перетворювача квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 26 з'єднаний з входом декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 27, а другий вихід з'єднаний з входом
25 блока оцінки стану каналу зв'язку 18. На вхід блока оцінки стану каналу зв'язку 18 надходять нормовані сигнали з виходів еквалайзерів першого 17 та другого каналів 19, з виходу модуля оцінки стану каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата матриця стану каналу зв'язку H надходить до блока 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.Н. Тихонова.

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

35 Як зазначалося вище, методи демодуляції для систем зв'язку MIMO ґрунтуються на оберненні матриці стану каналу зв'язку. Найбільш розповсюдженими методами демодуляції для MIMO 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
40 MIMO з неортогональним просторовим мультиплексуванням є методи Zero Forcing – метод форсування нуля та метод мінімуму середньоквадратичної похибки (MCKO, або MMSE Minimum MeanSquare Error).

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

50 Суть метода 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]:

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

де $S^{ZF} = W_{ZF} \cdot y = (H^H H)^{-1} H^H (Hs + n)$ - матриця лінійного перетворення, яка являє собою псевдозворотню матриці Мура-Пенроуза, або у випадку квадратної неособливої матриці H ,
 $S^{ZF} = W_{ZF} \cdot y = (H^H H)^{-1} H^H (Hs + n)$.

55 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 вигляді:

$$(H + \lambda I) \cdot s = y, \tag{3}$$

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

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

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 Тихонова $\Omega(s, \lambda)$ виникає проблема виявлення глобального мінімуму при наявності локальних (Фіг. 2).

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

$$S^{ZF} = (W_{ZF} + \lambda I) \cdot y \tag{5}$$

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

Результати моделювання системи зв'язку MIMO, в який 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 і представлені у (Фіг. 3). З Фіг.3 видно, що в наслідок додаткового застосування процедури регуляризації по методу А.Н. Тихонова ефективність найбільш швидкого демодулятора Zero Forcing MIMO 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 MIMO, 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.

Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) 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 апарата 11 та на вхід модулятор ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата буде пропорційною обраній 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 апарата, відповідно 3 та 4, які мають однакове функціональне призначення та однакове конструктивне виконання.

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

З виходу синтезатора частот першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 13 надходить інформаційна послідовність на вхід еквалайзера першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата

12, що виконує функцію вибору алгоритму вирівнювання (корегування) характеристик каналу в залежності від сигнальної та завадової обстановки.

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

10 Другий канал передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 4 працює аналогічно першому каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 3:

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

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

25 На вхід еквалайзеру другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 15 надходить інформаційна послідовність, сформована в модуляторі ВЧ другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 14 та інформаційна послідовність з синтезатора частот другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 16.

30 Інформаційна послідовність з виходу еквалайзеру першого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 12 та еквалайзеру другого каналу передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата 5 та антенний пристрій другого каналу прийомопередавача безпілотного літального апарата 6.

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

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

45 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 блока оцінки стану каналу зв'язку 18, матриця стану каналу зв'язку надходить до блока 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.Н. 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 MIMO

55 прийомопередавача безпілотного літального апарата. У демодуляторі першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 21 та демодуляторі другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23 при надходженні інформаційної та службової послідовності з виходу синтезатора частот першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 20 та синтезатора частот другого каналу

приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата 20 та 24 ідентичні за своєю будовою та функціональним призначенням синтезаторам передавальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата 21 та демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23 сигнал надходить на вхід буферного пристрою приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 25 який виконує функцію накопичення до певного рівня інформації, що надходить з виходу демодулятора першого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 21 та демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 23.

Після накопичення певної кількості необхідної для роботи інформації буферний пристрій приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 25 передає накопичену інформацію на перетворювач квадратур приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 апарата 26 сигнал надходить на вхід декодера приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата 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.

Підвищення ефективності застосування запропонованої системи з множиною входів та множиною виходів (MIMO) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією, у порівнянні з найближчим аналогом, досягається за рахунок додаткового введення блока 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.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

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 – аналог.

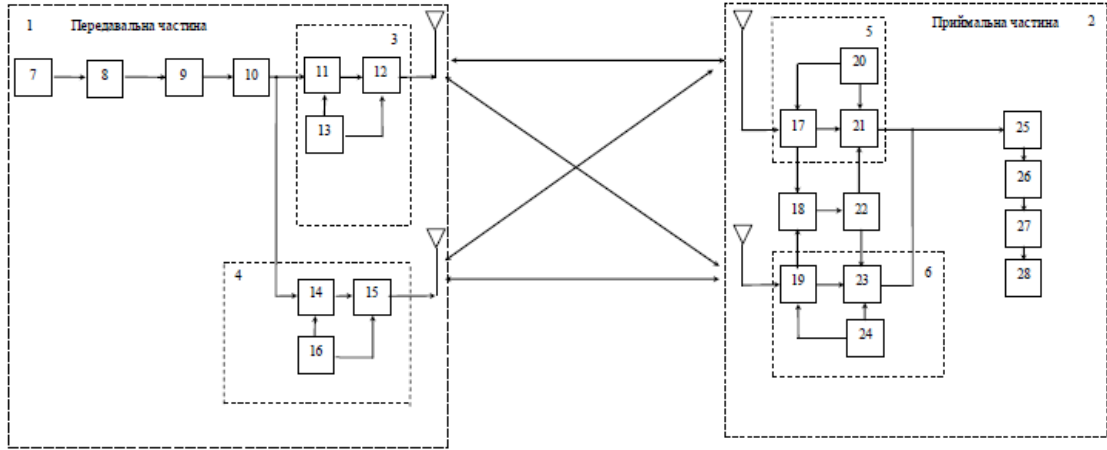
2. Патент України на корисну модель № 127599 "Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO)", зареєстрований 10.08.2018, бюл. № 15 – найближчий аналог.

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.

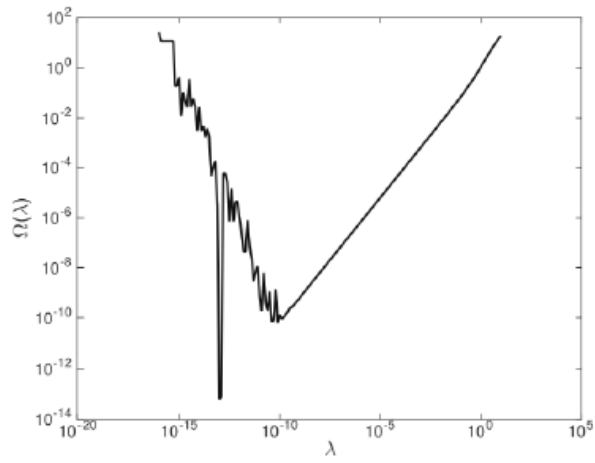
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Система з множиною входів та множиною виходів (MIMO) для безпілотних літальних апаратів з регуляризацією, що містить передавальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата, приймальну частину прийомопередавача безпілотного літального апарата, при цьому передавальна частина прийомопередавача безпілотного літального апарата 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 прийомопередавача безпілотного літального апарата,

каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата, а другий вихід блоку регуляризації з'єднано з входом демодулятора другого каналу приймальної частини прийомопередавача безпілотного літального апарата.



Фиг. 1



Фиг. 2

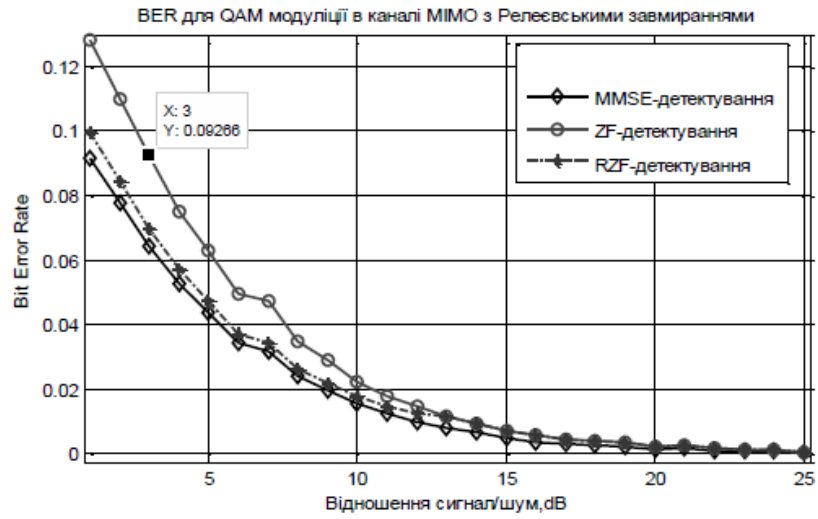


Fig. 3