

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.003>

УДК 520.27: 523.4

PACS 95.75.Wx

В.Б. Рябов<sup>1</sup>, В.В. Захаренко<sup>2,3</sup>, В.Ю. Харланова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Університет Майбутнього Хакодате

116-2, Камеданакано-чо, м. Хакодате, преф. Хоккайдо, 041-8655, Японія

<sup>2</sup> Радіоастрономічний інститут НАН України

вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

## УСУНЕННЯ ЗАВАД У ДИНАМІЧНИХ СПЕКТРАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПОТУЖНОГО СИГНАЛУ.

### Частина 1. ПОТУЖНІ ШИРОКОСМУГОВІ ІМПУЛЬСИ ТА ЛІНІЙНО ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНІ ЗАВАДИ

**Предмет і мета роботи.** Метою роботи є розробка та тестування нового підходу до ідентифікації завад на прикладі аналізу даних радіовипромінювання Юпітера. Проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованого методу з результатами інших авторів для випадку значного перекриття потужного корисного сигналу з завадами в частотно-часовому вікні областей існування.

**Методи та методологія.** Проведені дослідження дозволили знайти кілька причин виникнення труднощів при виявленні завад традиційними методами. Пропонується новий підхід до розділення корисних і завадових сигналів на частотно-часовій площині, заснований на перенесенні статистичного аналізу з простору амплітуд сигналів у простір патернів, що формуються максимальними значеннями при скануванні спектрограм за часом, частотою або в комбінованому напрямку.

**Результати.** Запропоновано методи статистичної обробки, спрямовані на виділення сигналів різної інтенсивності на фоні завад, порівнянних за потужністю з корисним сигналом, що дає можливість проведення детального дослідження частотно-часових структур. Показано, що розроблені алгоритми мають високу стійкість щодо зміни завадової обстановки, обумовленої як людською активністю, так і природними причинами, такими як вплив іоносфери, зміна амплітудно-часової характеристики приймального тракту при перенаправленні променя антенної решітки, фарадеївського обертання площини поляризації прийнятого випромінювання.

**Висновки.** Необхідність створення нових алгоритмів боротьби з завадами обумовлена як погіршенням загальної завадової обстановки в радіочастотному діапазоні, так і ускладненням спорадичних частотно-часових структур, що ста-

Цитування: Рябов В.Б., Захаренко В.В., Харланова В.Ю. Усування завад у динамічних спектрах за наявності потужного сигналу. Частина 1. Потужні широкосмугові імпульси та лінійно частотно-модульовані завади. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29, № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.003>

Citation: Ryabov, V.B., Zakharenko, V.V., Kharlanova, V.Yu., 2024. Mitigating interference in dynamic spectra in the presence of powerful signals. Part 1. Powerful broadband pulses and linear frequency-modulated interference. *Radio Phys. Radio Astron.*, **29**(1), pp. 3–14. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.003>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ють наявними при покращенні часової та частотної роздільних здатностей при реєстрації сигналів. При цьому значного прогресу вдалося досягти при внесенні фундаментальних змін у алгоритм обробки, які засновано на зміні напрямків аналізу на площині час—частота.

**Ключові слова:** завади в радіодіапазоні,  $S$ - і  $L$ -випромінювання Юпітера, статистичні індикатори, моменти, УТР-2, цифрова обробка сигналів, порогове виявлення.

## Вступ

Видалення завадових сигналів з динамічних спектрів, записаних з високою часовою і частотною роздільною здатністю та високою чутливістю приймального тракту радіотелескопа, є важливою проблемою обробки спостережних даних як в радіоастрономії декаметрового діапазону, так і в більш високочастотній частині спектра. Зазначимо, що оскільки рішення про наявність завадових сигналів у тій чи іншій області частотно-часової площини приймається, зазвичай, на початкових етапах аналізу, неточності застосовуваних статистичних методів можуть істотно впливати на всі наступні стадії обробки та кінцеві результати аналізу, пов'язані з побудовою моделей і оцінкою параметрів, які відображають фізичні властивості джерела випромінювання та/або міжзоряного середовища на шляху поширення радіохвиль.

Методи первинного аналізу даних [1], що вже стали класичними, включають, як правило, введення порогових значень для стандартних статистичних характеристик, таких як середньоквадратичні відхилення амплітуд спектральної густини від їхніх середніх або медіанних значень у кожному частотному каналі (або в кожен фіксований момент часу), обчислені в деякому заданому частотно-часовому вікні. Області частотно-часової площини, де спектральна амплітуда перевищує поріг, виключаються з подальшого розгляду за допомогою їхнього спеціального маркування, і подальший аналіз проводиться за вільними від завад ділянками спектрограм. Необхідно відзначити, що аналіз даних, який проводиться після видалення завад, часто засновано на розрахунку саме тих статистичних характеристик (середнє значення, середньоквадратичне відхилення), які використовувалися на початковому етапі обробки даних для виявлення завад, що може призводити досить часто як до неточних висновків про спектральні властивості досліджуваних космічних джерел, так і до значного придушен-

ня корисного сигналу. Особливо сильно зазначені недоліки алгоритмів пошуку завад позначаються при перекритті за часом та/або частотою сигналів земного та космічного походження, а також при високій чутливості радіотелескопів, що використовуються для спостережень. Висока чутливість призводить до значного збільшення кількості частотно-часових структур, присутніх у спектрограмах, а також до розширення їхньої морфології та різноманітності рівнів потужності сигналу, що значно ускладнює процедури поділу сигналів на корисні та завадові [2, 3].

Вказаних вище протиріч вдається уникнути (принаймні частково) шляхом використання додаткових засобів на подальших етапах виявлення завадових сигналів, таких як комбіноване порогове детектування [4, 5], морфологічний аналіз за допомогою масштабно-інваріантних порядкових операторів [6] та їхньої комбінації з високочастотним і низькочастотним фільтруванням [7], ітеративне комбіноване порогове детектування на логарифмічному та лінійному масштабах з подальшим двовимірним фур'є-аналізом і підходом, заснованим на перетворенні Радона [8]. Відзначимо також великий інтерес, який останнім часом приділяють методам, заснованим на комбінації стандартних статистичних алгоритмів з новими підходами, розробленими в областях обробки даних, пов'язаних із штучним інтелектом [9, 10].

Основним висновком, до якого приходять більшість дослідників, є розуміння складності проблеми виділення корисного сигналу на фоні завад і необхідності комбінованого використання кількох різних методів для відповідного маркування областей на частотно-часовій площині. Крім того, всі запропоновані алгоритми вимагають «тонкого налаштування» з використанням різних додаткових параметрів. Багато авторів також стикаються з необхідністю використання різних методів при застосуванні різних радіотелескопів, врахування особливостей завад, властивих конкретним географічним координатам

спостерігача, дослідження конкретних особливостей, пов'язаних із частотно-часовою структурою радіовипромінювання спостережуваних об'єктів [11, 12].

Особливо важливим параметром виділення корисних сигналів на фоні завад є очікуваний характерний часовий масштаб фізичних процесів, які підлягають дослідженню. Іншими словами, неможливим здається створення універсального алгоритму виявлення завад при дослідженні, наприклад, мілісекундних частотно-дрейфуючих S-сплесків у магнітосфері Юпітера та параметрів, які визначають часову еволюцію бурі декаметрового випромінювання, що триває протягом декількох годин.

У цій роботі пропонується новий метод аналізу завадової обстановки, що використовується на радіотелескопі УТР-2 і, хоча він враховує деякі особливості низькочастотної частини спектра, в якій проводилися спостереження, він може застосовуватися практично в будь-яких інших діапазонах частот, де основним об'єктом, отриманим із спостережних даних, є спектрограма, записана з високою часовою та частотною роздільною здатністю. Зазначимо, що поняття «висока роздільна здатність» є, зрозуміло, відносним, і в даному випадку зважаємо на те, що при виборі вікна для аналізу на частотно-часовій площині здійснюється досить щільне покриття цієї ділянки площини даними для отримання статистично значимих оцінок як у горизонтальному та вертикальному, так і довільному напрямках.

## 1. Особливості застосування стандартних методів для радіотелескопа УТР-2

Калібрування великих фазованих антенних решіток має великий вплив на всі етапи обробки сигналів та є вельми складною проблемою. У даному пункті ми присвятимо увагу проблемі визначення статистичних параметрів прийнятих сигналів, що важливо для задачі придушення завад, з урахуванням особливостей фазування УТР-2 [13].

Згаданий вище пороговий алгоритм (назвемо його класичним) не завжди приводить до ефективного видалення всіх завад. Фундаментальною проблемою при його використанні є обчислення основних моментів, таких як середнє значення та

середньоквадратичне відхилення (далі  $\mu$  та  $\sigma$ ), від яких відраховуються всі інші рівні (маркування завад тощо). Найкращим чином цей алгоритм поводить за наявності коротких сигналів космічних джерел, до і після яких у записі є лише шумовий сигнал. Прикладом таких сигналів є імпульси пульсарів, розряди блискавок в атмосфері Сатурна, транзйенти. У цьому випадку можна, наприклад, незалежно аналізувати частотні канали, в яких короткі ширококутові завади ефективно видаляються, а канали з наявністю тривалих завад (широкомовні станції, службові станції зв'язку, навігації тощо) усуваються на етапі аналізу вузькосмугових завад (що буде предметом опису другої частини даної роботи). Для космічних ширококутових сигналів видалення кількох відсотків вузькосмугових каналів при тому, що, наприклад, сигнал пульсара займає 50...90 % каналів з усього спектра, великого впливу на кінцевий результат не дає.

Зовсім іншою може бути картина при розділенні завад і корисних сигналів у записах радіовипромінювання Юпітера та Сонця. Наявність тривалих (у порівнянні з часом перенаправлення радіотелескопа, який при дискретно-безперервному стеженні за об'єктом становить десятки секунд або хвилини) сплесків випромінювання Юпітера або різних типів сонячного радіовипромінювання призводить до того, що рівень шумів неможливо визначити коректно — галактичні шуми становлять невідому малу частину фонового сигналу. Додатковою складністю є повільна — порівняно з довжиною кадру обробки — модуляція фонового сигналу, яка має велику амплітуду. У таких умовах розраховане значення сигма в каналі в багато разів перевищує значення, що характеризує галактичний шум. Окремим випадком є завада від ширококомовної або зв'язкової станції, сигнал якої є завжди та має помітну модуляцію. Тоді завади виявляються нижчими від формально заданого рівня  $\mu + 3\sigma$  і залишаються «непомітними» для класичного методу.

Можна спробувати поліпшити класичний алгоритм, ретельно визначаючи рівень шуму у вузькосмуговому каналі за допомогою ансамблю точок поблизу мінімальних значень (для стійкості методу використовуються інтервали від кількох одиниць до 20 %). Другий варіант —

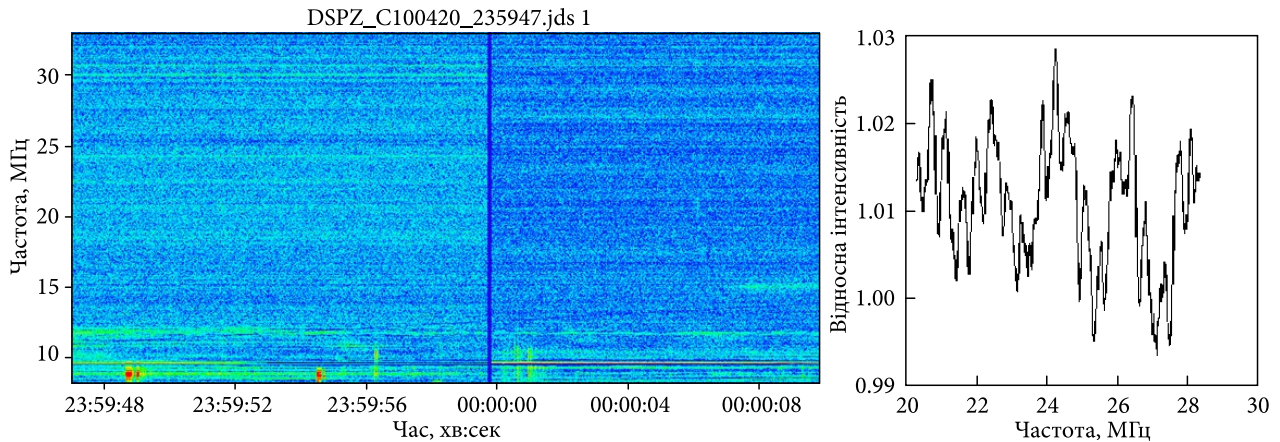


Рис. 1. Зміна рівня фону та частотної залежності під час перемикання антени УТР-2. Праворуч — графік відносного спектрального відгуку радіотелескопа в діапазоні 20...29 МГц (часові відліки усереднені в інтервалі 5 с до і після перемикання)

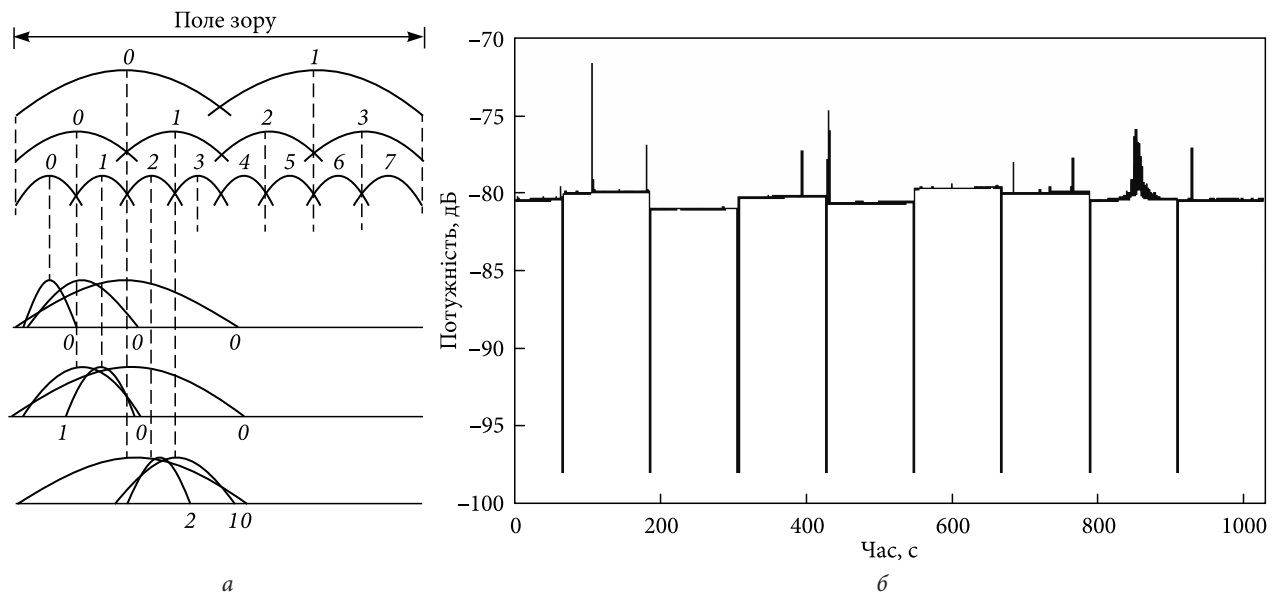


Рис. 2. Зміна рівня відгуку радіотелескопа УТР-2 при стеженні за слабким радіоджерелом. Форма діаграми направленості радіотелескопа, що визначається трьома послідовними рівнями фазування антени [13] (а). Результат стеження за джерелом під час перемикання 120 с [14] (б)

застосувати дані калібрування радіотелескопа. Розглянемо деякі недоліки цих варіантів.

Використання, умовно кажучи, квантиля мінімальних значень (найменших за інтенсивністю відліків) не гарантує того, що під час проведення аналізу в кадрі спектрограми в даному каналі буде враховано лише шумові (мається на увазі шум Галактики та шум тракту радіотелескопа) сигнали. Якщо протягом аналізованого кадру спектрограми завада присутня безперервно, обидва значення  $\mu$  і  $\sigma$  можуть бути набагато вище величин, що визначаються рівнем галактичного фону.

Що стосується підходу з використанням калібрування, він передбачає наявність каліброваного джерела шуму. У низькочастотній радіоастрономії дуже мало сильних космічних джерел, досить рівномірно розподілених по небу. Крім того, іоносфера може значно спотворювати хвильовий фронт, що призводить до послаблення та мерехтіння джерела. У разі використання багатопроменевої антенної решітки УТР-2 можна спробувати взяти як калібрувальне джерело сигнал галактичного фону з «OFF» променя, але джерело часто спостерігається низько над горизонтом, тому через розширення діаграми на-

правленості в «OFF» промінь потрапляють як джерело, так і завади широкоповних станцій.

Використання калібрувальних шумових генераторів вимагає розподіленої системи калібрування, так само складної, як і основна система фазування великої антенної решітки. Тому зазвичай систему калібрування спрощують. Наприклад, сигнал калібрувального генератора не доводять до кожного диполя, а вводять тракт радіотелескопа в деякому проміжному перерізі. Крім того, зміни фазування самого калібрувального сигналу зазвичай не передбачено. Це означає, що сигнал калібрування надходить начебто з одного (наприклад, зенітного) напрямку. Цей напрямок вдається добре відкалібрувати. Але, як тільки потрібно перевірити інші напрямки наведення радіотелескопа, відразу доводиться зіткнутися з частотно-залежними характеристиками передачі фазообертачів, загасанням і неузгодженістю хвильових опорів частин тракту за різних нахилів променя. Приклад спотворення частотної залежності радіотелескопа при перенаправленні променя антени показано на рис. 1.

При калібруванні промінь віртуально направлено у зеніт, а при актуальному положенні променя при спостереженнях перерозподіляються довжини кабелів (частотно-залежна частина згасання) і атенюатори, що компенсують їх (частотно-незалежна частина). Причому навіть якщо загасання є функцією, яка монотонно залежить від частоти та в принципі може бути врахованою, стояча хвиля в довгому тракті (десятки й сотні довжин хвиль робочого діапазону) великого радіотелескопа через температурну залежність електричної довжини кабелю практично стає випадковою величиною. При коефіцієнті стоячої хвилі  $\sim 1.2$  у результаті перемикання амплітуда сигналу в каналі може змінитися на 40 %. У результаті усереднення по антенному полю різниця стає меншою, але все одно може становити 10...20 %. На правій панелі рис. 1 видно прояв цих ефектів — зміна середнього значення фону, нахилу спектра та наявність помітних осциляцій, які не дають можливості спиратися на добре відкалібровані значення навіть у зенітному напрямку радіотелескопа.

Ще одним мінусом з точки зору калібрування є асинхронне управління фазообертачів. Найближчий до антенного елемента фазообертач

має найстарші розряди управління. Чим далі по тракту знаходиться фазообертач, тим більше молодших розрядів включається в процес фазування. На рис. 2 наведено послідовність декількох двоххвилинних інтервалів з перенаправленням радіотелескопа УТР-2 при стеженні за слабким радіоджерелом. Видно стрибки середнього рівня в межах 1 дБ ( $\sim 23\%$ ). При цьому основну частину потужності, яку приймає радіотелескоп, становить фон Галактики.

Без сумніву, використання цифрових пристроїв і швидкісної обробки в реальному часі може полегшити процес калібрування. Можна вже зараз запропонувати схеми фазування, які створюватимуть єдиний шумовий сигнал на всіх антенах радіотелескопа, використовуючи мініатюризацію, широкопasmові канали зв'язку тощо. Але це все ще залишається далеким від реалізації варіантом схеми радіотелескопа через помітне зростання складності та вартості пристроїв.

## 2. Основна ідея пропонуваного нового підходу

Як вже зазначалося у вступі, одними з основних труднощів при аналізі даних космічного походження, особливо якщо висока чутливість антенної системи призводить до досить великої амплітуди корисного сигналу в спектрограмі, є використання однакових статистичних індикаторів як на етапі пошуку завад, так і при наступних кроках, пов'язаних з інтерпретацією властивостей сигналів. Подальша обробка стає складною насамперед через перекриття різноманітних завад за часом і частотою. Це призводить до необхідності проводити ідентифікацію завад у кілька етапів, а також застосовувати ітераційні процедури. Значення амплітуди, що використовуються при оцінці  $\sigma$ , через сильну нестаціонарність завадових сигналів, а також їхній високий рівень потужності часто виявляються сильно спотвореними. Закони розподілу також відмінні від гауссового. Все це призводить до значних труднощів при виборі порогових значень у статистичних алгоритмах (наприклад, правило  $3\sigma$ ).

Як показує практика, ефективність алгоритмів, що застосовуються, значною мірою залежить як від рівня потужності завади в порівнянні з корисним сигналом, так і порядку

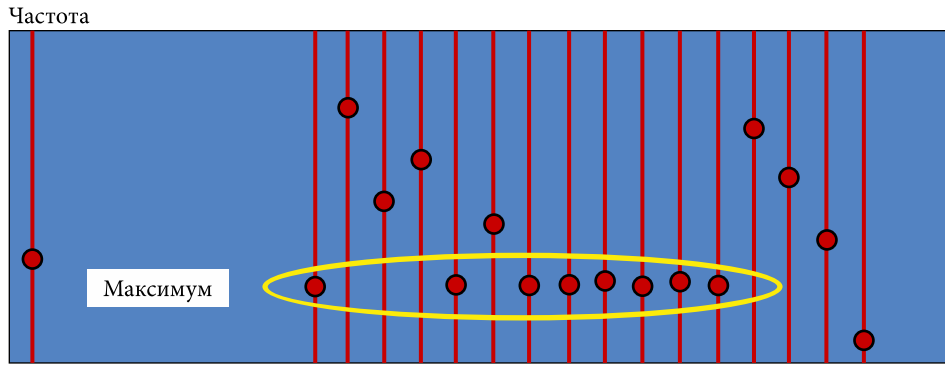


Рис. 3. Алгоритм виявлення горизонтальних лінійних завадових сигналів

застосування процедур, що визначаються заданими пороговими значеннями. Можна припустити, що здатність програм обробки відрізнити заваду від сигналу в певному сенсі подібна до людського сприйняття (візуального аналізу) при дослідженні спектрограм, коли яскраві кольори (потужні сигнали) роблять непомітними на їхньому тлі менш потужні спектральні компоненти (слабкі сигнали) і лише видалення (маскування) потужних сигналів дозволяє виявити сигнали з меншою амплітудою.

Таким чином, всі вищезгадані труднощі призводять до висновку щодо відносної неточності стандартних методів обробки та диктують необхідність введення альтернативних заходів. Таку спробу аналізу, що використовується на початковому етапі боротьби із завадами, зроблено у цій роботі. Оскільки найпоширеніші завади при аналізі спектрограм на площині час—частота є лінійними структурами (вертикальні, горизонтальні та похилі лінії), ми спробували зосередити зусилля на створенні ефективного способу виявлення саме такого роду сигналів.

Для того, щоб уникнути фундаментальних труднощів, пов'язаних з використанням однакових індикаторів на різних етапах обробки, ми пропонуємо замість значень амплітуди сигналу використовувати інформацію про взаємне розташування максимальних значень амплітуди на площині час—частота. З іншого боку, пропонується запровадити принцип ортогональності оцінок, який полягає в тому, що при необхідності видалити, наприклад, горизонтально розташовану лінійну завадову структуру слід фіксувати положення максимальних значень у перпендикулярному напрямку, тобто шукати максимуми

у значенні амплітуди за частотою в кожний момент часу (рис. 3). Точки максимальних значень, позначених маркерами, сконцентровані поблизу одного і того ж значення частоти. Пошук максимальних значень відбувається в кожен момент часу вздовж ліній, паралельних осі частот. Таке розташування максимумів швидше за все означає наявність вузькосмугового завадового сигналу всередині області, що позначена овалом. Аналогічний підхід може бути застосовано також до вертикальних ліній (імпульсні завади) та завад, що характеризується лінійним частотним дрейфом (станції похилого іоносферного зондування).

### 3. Усунення найпотужніших завад. Похилі лінії від іоносферних станцій. Перенаправлення антени

Для ілюстрації деяких особливостей запропонованого методу розглянемо приклад динамічного спектра, записаного на радіотелескопі УТР-2 під час сеансу спостереження радіовипромінювання Юпітера 8 лютого 2018 року. На рис. 4 наведено фрагмент запису, що містить як велику кількість завад, так і досить потужне випромінювання Юпітера.

Практика свідчить, що іоносферні станції є найскладнішою завадою. При спробі ідентифікувати присутність сигналу іоносферної станції виникає необхідність також усунути наявні в динамічному спектрі завадові сигнали перенаправлення променя антени, які зустрічаються кожну хвилину або дві та є яскравою вертикальною лінією на динамічному спектрі. Також потужні імпульси, які часто не відрізняються від сигнала

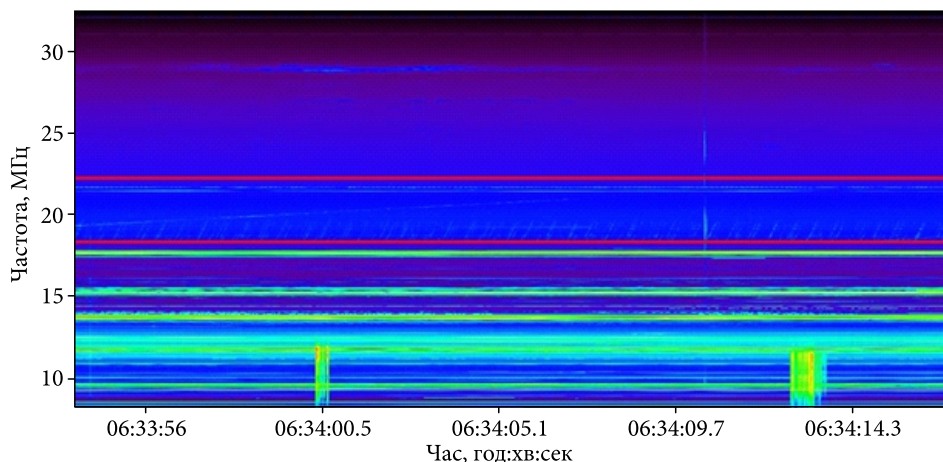


Рис. 4. Динамічний спектр при спостереженнях Юпітера від 08.02.2018 без обробки (колір відповідає логарифму спектральної густини, часова роздільна здатність 5.2131 мс, частотна — 4.028 кГц)

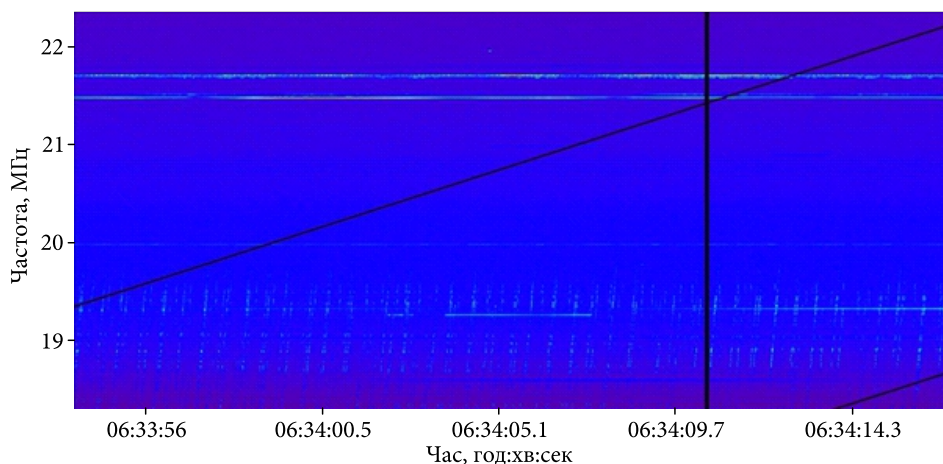


Рис. 5. Фрагмент між червоними лініями на рис. 4 динамічного спектра спостережень Юпітера після вирізування сигналу іоносферної станції (чорні похилі лінії) та потужної імпульсної завади (чорна вертикальна лінія)

лів перенаправлення антен, можуть спорадично бути присутніми в динамічних спектрах. Крім того, додаткові труднощі завжди привносять горизонтальні лінії завад. Наприклад, на рис. 4 сигнали від іоносферної станції мало помітні, бо їх замасковано потужними вузькосмуговими завадами низькочастотної частини спектра. Їх добре видно, якщо намалювати лише частину спектра між червоними лініями (рис. 5). Надалі алгоритм обробки будуватиметься таким чином, щоб послідовно усувати сигнали перенаправлення антени (а також інших потужних широкосмугових імпульсів), потім сигналів іоносферних станцій, і лише наприкінці видалити завади, породжені вузькосмуговими станціями.

Запропонований авторами алгоритм, таким чином, може бути показаний як наступна послідовність кроків.

*Крок 1.* Знайти положення максимумів окремо для кожного значення частоти. Приклад такого розрахунку наведено на рис. 6. Добре помітні похилі лінії, що відповідають сигналам іоносферних станцій вище 15 і 19 МГц, а також лінія меншого нахилу, розташована нижче 15 МГц. Довга вертикальна лінія в момент часу близько 11 с перевищує заданий в алгоритмі поріг, що дозволяє ідентифікувати її як потужну імпульсну заваду. Вертикальна лінія знаходиться в часі далеко від цілих значень хвилин (до яких прив'язано переключення кодів керування), тому вона не є пере-

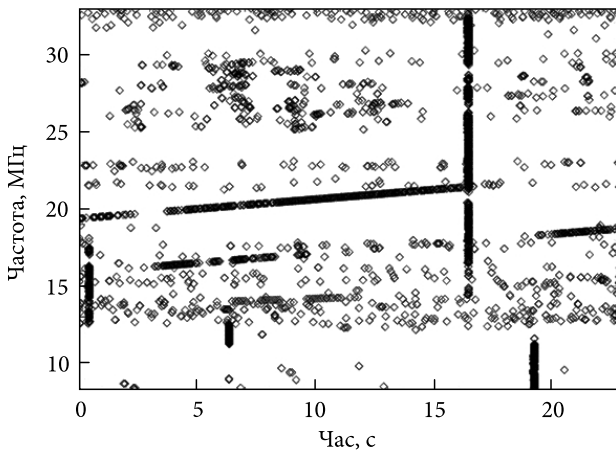


Рис. 6. Положення максимумів у кожному частотному каналі динамічного спектра, наведеного на рис. 4

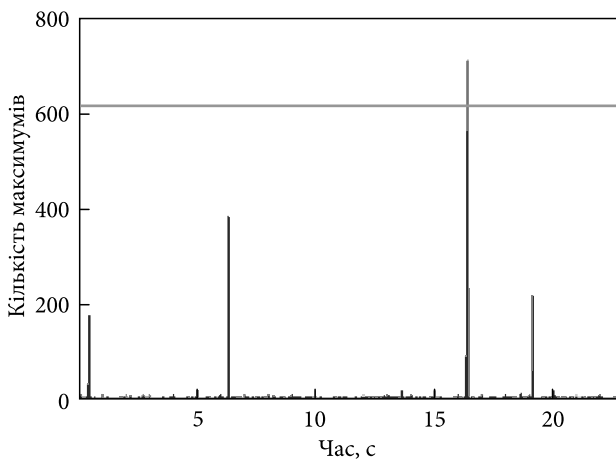


Рис. 7. Кількість максимумів у кожний момент часу для діаграми (див. рис. 6)

направленням антени. Добре видно лінії з різним нахилом, що відповідають сигналам іоносферних станцій.

**Крок 2.** Для кожного моменту часу знайти кількість відповідних максимумів і побудувати гістограму. Якщо максимуми у великій кількості частотних каналів трапляються одночасно, що означає наявність потужної вертикальної лінії на динамічному спектрі, то даний час маркується й виключається з подальшого пошуку похилих ліній у динамічному спектрі. Гістограму залежності кількості максимумів від часу наведено на рис. 7. Гістограма перевищує граничне значення лише для однієї з імпульсних завад, присутніх у динамічному спектрі. Ця завада може серйозно впливати на процес виявлення похилих ліній, пов'язаних із завадами іоносферних станцій, і тому вона

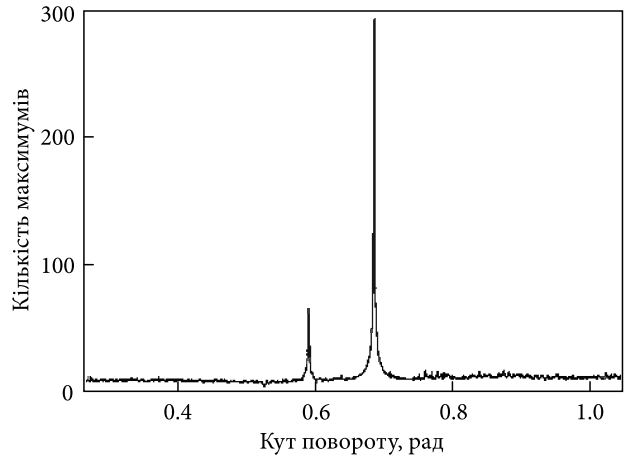


Рис. 8. Залежність пікового значення кількості максимумів у гістограмі (рис. 7) від кута повороту проти годинникової стрілки для положення максимумів наведеного на рис. 6

повинна бути видалена на початковому етапі обробки. Інші вертикальні лінії доцільно виявляти вже після видалення вузькосмугових завад. На цьому етапі виникає необхідність введення порогового значення кількості максимумів, при перевищенні якого відповідний момент часу вважатиметься перенаправленням антени або потужним імпульсом. Таким достатнім порогом є значення 10 % від загальної кількості частотних каналів, хоча, звичайно це значення є параметром, що налаштовується і, отже, може змінюватися в залежності від заводової обстановки.

**Крок 3.** Зробити послідовність повернутих зображень рис. 6 на кут в інтервалі  $[0^\circ, 90^\circ]$  з дрібним інкрементом, роблячи обчислення, аналогічні тим, які проводилися на *Кроці 2*, тобто підраховуючи кількість максимумів у кожний момент часу та знаходячи максимальне значення на відповідній гістограмі. Такі обчислення приводять до діаграми, зображеної на рис. 8, де нанесено графік залежності пікового значення кількості максимумів від кута повороту. Характерний максимум відповідає куту повороту, що дорівнює нахилу ліній іоносферних станцій. Значимо наявність двох піків, відповідних наявності лінійно частотно-модульованих сигналів з різним нахилом на частотно-часовій площині.

Після видалення потужних широкосмугових імпульсів і похилих ліній від іоносферних станцій необхідно зосередити зусилля на видаленні сигналів, що є завадами двох типів: вузькосмугові сигнали різної потужності (горизонтальні



лінії на динамічних спектрах), а також імпульсні завади середньої та малої потужності, не видалені на першому кроці обробки.

Завдання таким чином зводиться до вирішення двох проблем. Однак результат обробки виявляється суттєво залежним від послідовності кроків, тобто які саме патерни, горизонтальні або вертикальні лінії видаляються на початку, а які в кінці процедури. Обидва кроки обробки можуть, зрозуміло, бути незалежними, якщо на наступному кроці не враховувати результати попереднього. Такий підхід, однак, часто призводить до небажаних ефектів, пов'язаних з тим, що невидалені сигнали, наприклад, вертикальні лінії в динамічному спектрі, істотно впливають на результати статистичного аналізу часових рядів, що відповідають частотним каналам, і навпаки, невидалені потужні вузькосмугові завади вимагають спеціальної обробки при виявленні імпульсних завад.

Досвід показує, що якщо найпотужніші імпульси (вертикальні лінії) ефективно видалено на першому етапі обробки сумісно з видаленням широкосмугових потужних похилих ліній, оптимальний алгоритм подальшого виявлення завад, що є предметом опису другої частини даної роботи, полягає в такому:

- виявлення горизонтальних ліній (в основному, вузькосмугових станцій короткохвильового діапазону);
- виявлення вертикальних широкосмугових ліній (імпульсів);
- виявлення нестационарних вузькосмугових сигналів, характерна тривалість або період повторення яких набагато коротше часового масштабу, обраного для видалення горизонтальних ліній;
- виявлення інших завад, як правило, імпульсного характеру, що мають дуже нестационарний характер;
- виявлення інших завад, що займають широку смугу частот і відрізняються аномально високою інтенсивністю.

#### 4. Обговорення

Завадові сигнали в декаметровому діапазоні є дуже різнотипними та змінними в часі. Особливо це проявляється при обробці даних радіотеле-

скопів з рекордною чутливістю, таких як УТР-2. Новий метод виявлення завадових сигналів у спектрограмах з високою часовою та частотною роздільною здатністю має низку переваг у порівнянні з підходами, що раніше використовувалися, особливо при спостереженні джерел великої потужності, таких як Юпітер, Сонце і деякі пульсари. Оскільки цей метод засновано на аналізі взаємного розташування максимумів сигналів у часі та по частоті, він має особливості використання для кожного з типів завад: широкосмугових, вузькосмугових, лінійно модульованих у часі тощо. Вище наведено приклад використання даного методу для виявлення завад іоносферних станцій (похилі лінії) і потужних завад імпульсного характеру (вертикальні лінії), характерних для моментів часу перенаправлення антени. Зазначимо, що такі завади хоч і є найбільш потужними і, отже, особливо сильно впливають на результати обробки, далеко не вичерпують список численних завадових сигналів, характерних для декаметрового діапазону. У наступній роботі буде наведено результати усунення вузькосмугових завад.

Проте для повного аналізу завадової обстановки та більш ретельного очищення динамічних спектрів необхідне використання комбінованих методів із застосуванням інших критеріїв (див., наприклад, роботи [3–12]), а також ретельне тестування багатоступінчастих процедур, де ефективність алгоритмів виявлення завадових сигналів істотно залежить від послідовності їхнього використання та визначається як потужністю самих завад, так і частотно-часовою структурою прийнятих корисних сигналів.

У цій статті відсутній детальний аналіз ефективності запропонованого алгоритму для будь-яких штучно створених за допомогою комп'ютера сигналів та/або набору динамічних спектрів, що характеризуються наборами різноманітних завад, одночасно присутніх на частотно-часовій площині. Натомість обрано підхід, що демонструє ефективність методу на одному характерному прикладі обробки даних від реального джерела.

Ми також не намагалися провести класифікацію структур, які утворюються на динамічних спектрах. З одного боку, такого роду класифікація є недоцільною через мінливий характер сигна-

лів штучного походження. З іншого, системний аналіз величезної кількості різних завадових сигналів передбачає наявність будь-якої загальноприйнятої системи параметрів, що характеризують завади, яка на цей час відсутня в літературі.

## Висновки

Новий метод виявлення завад, заснований на аналізі взаємного розташування максимумів сигналу, забезпечує високу ефективність порівняно з широко використовуваними методами, які аналізують статистичні характеристики сигналу в окремих частотних каналах або часових інтервалах. Це яскраво проявилось при обробці спектрограм з високою часовою та частотною роздільною здатністю, отриманих при спостереженнях декаметрового випромінювання Юпітера на радіотелескопі УТР-2, коли і корисний сигнал, і завади мають високий рівень інтенсивності.

Необхідно зазначити, що запропонований метод може бути ефективно використаний не тіль-

ки при аналізі потужних сигналів космічного походження, але й у разі пошуку слабких сигналів, таких як транзйенти, випромінювання екзопланет, слабких пульсарів і т. п. [14]. Для таких джерел необхідно провести детальний аналіз ефективності алгоритмів, вибір і оптимізацію керуючих параметрів, а також розробити стратегію наступних кроків, пов'язаних з обробкою даних після видалення завад.

У цій роботі не обговорюються питання, пов'язані з подальшою обробкою корисного сигналу, де завади не було виявлено, або методи заміщення завад шумовими або іншими сигналами, наприклад, за допомогою інтерполяції [15]. Все це, безсумнівно, становить великий інтерес для майбутніх досліджень.

*Вячеслав Захаренко дякує за фінансову підтримку проекту Europlanet 2024 RI, що фінансується Програмою досліджень та інновацій «Горизонт 2020» Європейського Союзу (грантова угода № 871149).*

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Fridman P.A., and Baan W.A. RFI mitigation methods in radio astronomy. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 378, Iss. 1. P. 327–344. DOI: 10.1051/0004-6361:20011166
2. Buch K.D., Naik K., Nalawade S., Bhatporia S., Gupta Y., and Ajithkumar B. Real-Time Implementation of MAD-Based RFI Excision on FPGA. *J. Astron. Instr.* 2019. Vol. 8, Iss. 1. 1940006. P. 1–10. DOI: 10.1142/S2251171719400063
3. Zhang P., Offringa A.R., Zucca P., Kozarev K., Mancini M. RFI flagging in solar and space weather low frequency radio observations. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2023. Vol. 521, Iss. 1. P. 630–637. DOI: 10.1093/mnras/stad491
4. Offringa A.R., de Bruyn A.G., Biehl M., Zaroubi S., Bernardi G., and Pandey V.N. Post-correlation radio frequency interference classification methods. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. Vol. 40, Iss. 1. P. 155–167. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x
5. Offringa A.R. *Algorithms for radio interference detection and removal*. PhD Thesis, ed. Mathematics and natural sciences. Univ. of Groningen. 2012. 212 p.
6. Offringa A.R., van de Gronde J.J., and Roerdink J.B.T.M. A morphological algorithm for improving radio-frequency interference detection. *Astron. Astrophys.* 2012. Vol. 539, id. A95. P. 1–10. DOI: 10.1051/0004-6361/201118497
7. Offringa A.R., Adebahr B., Kutkin A., Adams E.A.K., Oosterloo T.A., van der Hulst J.M., Dénes H., Bassa C.G., Lucero D.L., Blok W.J.G., Hess K.M., van Leeuwen J., Loose G.M., Maan Y., Oostrum L.C., Orrú E., Vohl D., and Ziemke J. An interference detection strategy for Apertif based on AOFlogger 3. *Astron. Astrophys.* 2023. Vol. 670, id. A166. P. 1–15. DOI: 10.1051/0004-6361/202245022
8. Zarka P., Mauduit E., and Lamy L. Alfvénic electron acceleration at Jupiter revealed by drifting radio bursts. *Nature Portfolio, under review*. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2148609/v1
9. Cheng J., Li Y., Zhang Y., Yan Y., Tan C., Chen L., Wang W. Mitigation of Radio Frequency Interference in the Solar Radio Spectrum Based on Deep Learning. *Solar Phys.* 2022. Vol. 297, Iss. 4. P. 1–19. DOI: 10.1007/s11207-022-01975-w
10. Yang Z., Yu C., Xiao J., and Zhang B. Deep residual detection of Radio Frequency Interference for FAST. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. Vol. 492, Iss. 1. P. 1421–1431. DOI: 10.1093/mnras/stz3521
11. Yuan M., Zhu W., Zhang H., Huang S., Xue M., Li D., Yue Y., Wang P., Niu J., Hu Y., Li C., Miao C., Wang Y., Meng L., and Peng B. Categorize radio interference using component and temporal analysis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2022. Vol. 513, Iss. 4. P. 4787–4801. DOI: 10.1093/mnras/stac963
12. Zakharenko V.V., Vasylieva I.Y., Konovalenko A.A., Ulyanov O.M., Serylak M., Zarka P., Griefsmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V.S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 431, Iss. 4. P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
13. Мень А.В., Содин Л.Г., Шарыкин Н.К., Брук Ю.М., Мельяновский П.А., Инютин Г.А., Гончаров Н.Ю. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 15–57.
14. Vasylieva, I.Y. *Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results*. PhD Thesis, ed. Astrophysic. Instrumentation and Methods for Astrophysic. Observatoire de Paris. 2015. 197 p.

15. Станіславський Л.О. Методи попередньої обробки даних радіоастрономічних спостережень для мінімізації небажаного впливу радіозавад на результати вимірювань. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27, № 4. С. 268–283. DOI: 10.15407/rpra27.04.268

Стаття надійшла 22.10.2023

## REFERENCES

1. Fridman, P.A., and Baan, W.A., 2021. RFI mitigation methods in radio astronomy. *Astron. Astrophys.*, **378**(1), pp. 327–344. DOI: 10.1051/0004-6361/20011166
2. Buch, K.D., Naik, K., Nalawade, S., Bhatporia, S., Gupta, Y, and Ajithkumar, B., 2019. Real-Time Implementation of MAD-Based RFI Excision on FPGA. *J. Astron. Instr.*, **8**, 1940006, pp. 1–10. DOI: 10.1142/S2251171719400063
3. Zhang, P., Offringa, A.R., Zucca, P., Kozarev, K., Mancini, M., 2023. RFI flagging in solar and space weather low frequency radio observations. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **521**(1), pp. 630–637. DOI: 10.1093/mnras/stad491
4. Offringa, A.R., De Bruyn, A.G., Biehl, M., Zaroubi, S., Bernardi, G. And Pandey, V. N., 2010. Post-correlation radio frequency interference classification methods. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **405**(1), pp. 155–167. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x
5. Offringa A.R. *Algorithms for radio interference detection and removal*. PhD Thesis, ed. Mathematics and natural sciences. Univ. of Groningen. 2012. 212 p.
6. Offringa, A.R., Van de Gronde, J.J., and Roerdink, J.B.T.M., 2012. A morphological algorithm for improving radio-frequency interference detection. *Astron. Astrophys.*, **539**, id. A95, pp. 1–10. DOI: 10.1051/0004-6361/201118497
7. Offringa, A.R., Adebahr, B., Kutkin, A., Adams, E.A.K., Oosterloo, T.A., Van der Hulst, J.M., Dénes, H., Bassa, C.G., Lucero, D.L., Blok, W.J.G., Hess, K.M., Van Leeuwen, J., Loose, G.M., Maan, Y., Oostrum, L.C., Orrú, E., Vohl, D., and Ziemke, J., 2023. An interference detection strategy for Apertif based on AOFlagger 3. *Astron. Astrophys.*, **670**, id. A166, pp. 1–15. DOI: 10.1051/0004-6361/202245022.
8. Zarka, P., Mauduit, E., and Lamy, L., 2022. Alfvénic electron acceleration at Jupiter revealed by drifting radio bursts. *Nature Portfolio, under review*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2148609/v1
9. Cheng, J., Li, Y., Zhang, Y., Yan, Y., Tan, C., Chen, L., Wang, W., 2022. Mitigation of Radio Frequency Interference in the Solar Radio Spectrum Based on Deep Learning. *Solar Phys.*, **297**(4), pp. 1–19. DOI: 10.1007/s11207-022-01975-w
10. Yang, Z., Yu, C., Xiao, J., and Zhang, B., 2020. Deep residual detection of Radio Frequency Interference for FAST. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **492**(1), pp. 1421–1431. DOI: 10.1093/mnras/stz3521
11. Yuan, M., Zhu, W., Zhang, H., Huang, S., Xue, M., Li, D., Yue, Y., Wang, P., Niu, J., Hu, Y., Li, C., Miao, C., Wang, Y., Meng, L., and Peng, B., 2020. Categorize radio interference using component and temporal analysis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **513**(4), pp. 4787–4801. DOI: 10.1093/mnras/stac963
12. Zakharenko, V.V., Vasylieva, I.Y., Konovalenko, A.A., Ulyanov, O.M., Serylak, M., Zarka, P., Griesmeier, J.-M., Cognard, I., and Nikolaenko, V.S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **431**(4), pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
13. Megn, A.V., Sodin, L.G., Sharykin, N.K., Bruck, Yu.M., Melyanovsky, P.A., Inyutin, G.A., Goncharov, N.Yu., 1978. Principles of construction and characteristics of antennas of the UTR-2 radio telescope. *Antennas*. Moscow, Russia: Svyaz' Publ., 26, pp. 5–57 (in Russian).
14. Vasylieva, I.Y., 2015. *Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results*. PhD Thesis, ed. Astrophysic. Instrumentation and Methods for Astrophysic. Observatoire de Paris. 197 p.
15. Stanislavsky, L.A., 2022. Methods of radio frequency interference mitigation on the stage of preliminary processing of received signals. *Radio Phys. Radio Astron.*, **27**(4), pp. 268–283 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra27.04.268

Received 22.10.2023

V.B. Ryabov<sup>1</sup>, V.V. Zakharenko<sup>2,3</sup>, V.Yu. Kharlanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Future University Hakodate

116-2 Kamedanakano-cho, Hakodate-shi, Hokkaido, Japan 041-8655

<sup>2</sup> Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>3</sup> V.N. Karazin National University of Kharkiv

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## MITIGATING INTERFERENCE IN DYNAMIC SPECTRA IN THE PRESENCE OF POWERFUL SIGNALS. Part 1. POWERFUL BROADBAND PULSES AND LINEAR FREQUENCY-MODULATED INTERFERENCE

**Subject and Purpose.** The writers aim at developing and testing a new method of interference mitigation, proceeding from the example of radio emissions from Jupiter. Its effectiveness is compared with the results of other workers, equally relating to the case of a significant overlapping, within the time-frequency window under analysis, of the areas occupied by the useful signal and the interference.

**Methods and Methodology.** The analysis has revealed several fundamental limitations associated with the use of standard statistical methods for identifying sources of interference. A new approach is proposed that allows separating useful signals from inter-

ference in the time-frequency plane. It is based on the idea of transferring the statistical analysis from the space of signal amplitudes to such of linear patterns which are formed by maximal readings while the spectrograms are being scanned in time, frequency or otherwise.

**Results.** Methods of statistical data processing have been suggested which allow analysis of signals of a variety of power levels against the background of interference of comparable intensity. This enables a detailed analysis of the time-frequency patterns demonstrated by signals with a broad range of parameter variations. The algorithms developed demonstrate stability against changes in the interference background conditions that may be caused either by human activity or by natural factors, such as, e.g. ionospheric perturbations, changes in the frontend frequency response of a receiver resulting from a changed antenna beam orientation, or else from Faraday's polarization plane rotation in the radio emission being received.

**Conclusions.** The necessity of creating new interference mitigation techniques is stipulated both by worsening of the general level of interference at radio frequencies, and by the growth of complexity in the sporadically emerging time-frequency patterns that result from the improved time and frequency resolutions in the course of signal reception. A significant progress has been achieved, owing exclusively to the fundamental modifications of the signal processing algorithms that are based on varying the direction of analysis in the time-frequency plane.

**Keywords:** *radio interference; Jovian S- and L-emissions; statistical indicators; moments; UTR-2 radio telescope; digital signal processing, threshold-level detection.*