

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.02.085>

УДК 520.27: 523.4

PACS 95.75.Wx

В.Б. Рябов¹, В.В. Захаренко^{2,3}, В.Ю. Харланова²

¹ Університет Майбутнього Хакодате

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

² Радіоастрономічний інститут НАН України

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

³ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61000, Україна

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

УСУНЕННЯ ЗАВАД У ДИНАМІЧНИХ СПЕКТРАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПОТУЖНОГО СИГНАЛУ Частина 2. ВУЗЬКОСМУГОВІ ЗАВАДИ УМОВНО-СТАЦІОНАРНОГО ХАРАКТЕРУ

Предмет і мета роботи. У роботі розглянуто застосування нового методу виявлення вузькосмугових завад — на прикладі фрагмента запису бурі Іо-С юпітеріанського радіовипромінювання, яка спостерігалася за допомогою радіотелескопа УТР-2 10 квітня 2020 р. Метою роботи є розробка ефективного алгоритму, що має виходити з детального розгляду особливостей завадової обстановки та впливу амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) телескопа на результат виділення завад.

Методи та методологія. Метод ортогонального виявлення лінійних завадових структур на динамічних спектрах потужних джерел радіовипромінювання є адаптованим для випадку вузькосмугових завад різної ширини та змінної інтенсивності, що знаходяться поблизу або перетинаються з областю, котра є зайнятою корисним сигналом. Для подолання ефекту впливу АЧХ запропоновано використовувати дискретне частотне сканування, яке дозволяє стійко апроксимувати усереднений спектр поліномом не вище другого ступеня й усунути частотний тренд, котрий заважає виявляти слабкі завадові сигнали в порівнянні з джерелом.

Результати. Розроблено ефективний підхід до виявлення вузькосмугових завад, які займають тривалий інтервал часу на динамічному спектрі (умовно-стаціонарні завади). Алгоритм протестовано на прикладі запису потужної бурі радіовипромінювання Юпітера. Показано, що розроблений метод може бути особливо корисним у випадках перекриття завад із корисним сигналом на частотно-часовій площині.

Висновки. Запропонований новий підхід до проблеми боротьби з завадами є ефективним засобом обробки сигналів, що базується на комбінованих алгоритмах поділу сигналів у частотно-часовому просторі. На відміну від застосовуваних рані-

Цит у в а н н я: Рябов В.Б., Захаренко В.В., Харланова В.Ю. Усування завад у динамічних спектрах за наявності потужного сигналу. Частина 2. Вузькосмугові завади умовно-стаціонарного характеру. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29. № 2. С. 85–97. <https://doi.org/10.15407/rpra29.02.085>

C i t a t i o n: Ryabov, V.B., Zakharenko, V.V., Kharlanova, V.Yu., 2024. Interference mitigation in dynamic spectra in presence of powerful signals of interest. Part 2. Narrowband interferences of weakly stationary character. *Radio Phys. Radio Astron.*, 29(2), pp. 85–97. <https://doi.org/10.15407/rpra29.02.085>

© 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/>)

ше методів, що базувалися на обчисленні моментів розподілу амплітуд, даний метод дозволяє уникнути використання тих самих статистичних індикаторів для виявлення завад і для наступних етапів обробки даних, що спрямовуються на побудову фізичних моделей та інтерпретацію даних спостережень.

Ключові слова: вузькосмугові завади, S- і L-випромінювання Юпітера, статистичні індикатори, моменти, УТР-2, цифрова обробка сигналів, граничне виявлення.

Вступ

Проблема виявлення вузькосмугових частотних каналів, заповнених завадами, останніми десятиліттями стала одним із класичних завдань у цифровій радіоастрономії. Вона виникає при використанні сучасних пристроїв цифрового запису радіосигналів практично в усіх аналізованих діапазонах довжин хвиль (див. роботу [1] та посилання в ній). Аналіз безлічі динамічних спектрів, отриманих при спостереженнях потужних джерел, таких як Юпітер, Сонце та деякі пульсари, дозволяє зробити висновок, що підхід, заснований на обчисленні стандартних статистичних індикаторів, формуванні маски поганих пікселів і коригуванні двовимірних зображень за допомогою операцій віднімання та нормування може призводити до досить серйозних спотворень у результируючих зображеннях динамічних спектрів, хоча часто дозволяє відрізнити сигнал, що досліджується, наприклад, S-сплески Юпітера на їхньому тлі.

У роботі [1] було запропоновано принципово новий підхід до проблеми виявлення лінійних завадових структур, що найчастіше зустрічаються в динамічних спектрах, як вузькосмугових, так і імпульсних, у тому числі частотно-дрейфуючих сигналів, заснований на їхньому ортогональному (або похилому) виявленні. Основна ідея методу полягає у відмові від використання статистичних індикаторів, таких як моменти статистичних розподілів амплітуд (середнє, медіана, середньоквадратичне відхилення та ін.), обчислених у тому ж напрямку на частотно-часовій площині, що й характеристики, які використовуються на наступних етапах для аналізу фізичних параметрів у пропозованих математичних моделях. Застосування цього методу демонструє високу ефективність за рахунок використання лінійності структур, утворених максимальними значеннями на площині час—частота. При цьому пошук таких структур проводиться в діапазоні напрямків, розташованих під певним кутом до ліній завад, що виявляються. У цій статті за-

пропозований підхід застосовано до виявлення вузькосмугових завад (горизонтальних ліній на площині час—частота), тоді як пошук максимальних значень проводиться в перпендикулярному напрямку (вертикальне сканування за частотою). Таким чином, у даному випадку можна говорити про ортогональне детектування завад (див. рис. 3 статті [1]).

1. Класичний підхід

Основним об'єктом для обробки на вході процедури ідентифікації завад для одного стандартного потоку спостережних даних можна вважати двовимірний масив даних $x(N, M)$, запис амплітуди перетворення Фур'є у вікні, що рухається в часі, довжиною M^2 . Таким чином, двовимірний масив x являє собою оцифровану спектрограму спостережних даних. Параметр M , що визначається довжиною часового вікна, та параметр N (кількість кроків за часом) довільно задаються користувачем, виходячи з можливостей наявних комп'ютерних засобів, необхідного мінімального рівня виявленого сигналу (чутливості), особливостей спектральних і часових характеристик досліджуваного випромінювання, а також завадової обстановки, що характеризується кількістю та типом присутніх завадових сигналів. Завдання полягає в побудові процедури розбиття частотних каналів на два класи: 1) що містять завади і 2) нормальні (без завад) канали.

Для більшості відомих і багаторазово використовуваних раніше підходів до аналізу завад можна назвати такі основні етапи.

1. Пошук статистичних індикаторів, які може бути використано для ідентифікації частотних каналів, схильних до дії завад. Найчастіше використовуються такі індикатори як середнє значення, медіана і стандартне відхилення, хоча кількість індикаторів, що визначаються за допомогою будь-яких моментів статистичного розподілу флуктуацій амплітуди вищого порядку, ніж середнє (початковий момент першого порядку) та сигма (центральный момент другого

порядку), практично не обмежена. У деяких випадках з метою ефективнішого придушення дії завад можна використовувати квантілі розподілу амплітуди [1]. Необхідно відзначити, що вибір придатних для аналізу індикаторів залежить як від індивідуальних переваг дослідників, так і від статистичних властивостей завад, що видаляються, а також властивостей корисних сигналів, на виділення яких на тлі завад спрямовано процедуру обробки. Це неминуче призводить до висновку про відсутність універсальних статистичних критеріїв виявлення завад, які можуть використовуватися для будь-яких типів сигналів і реєструючої апаратури. Крім того, як показано в наступному розділі, в деяких випадках (проте таких, що досить часто зустрічаються через високу чутливість антени), коли амплітуда корисного сигналу перевищує рівень завад, використання стандартних статистичних індикаторів для виділення частотних каналів, які містять заваду, наштовхується на фундаментальні обмеження.

2. Використання різноманітних статистичних характеристик для вирівнювання спектра, тобто видалення впливу АЧХ приймального тракту, що ускладнює поділ вузькосмугових сигналів на групи корисних сигналів і завад. Зазначимо, що в ідеальному випадку форму АЧХ можна визначити будь-яким незалежним від процесу видалення завад способом за отриманими тестовими даними без завадових сигналів. Однак, як показують численні приклади аналізу спостережних даних, така характеристика може сильно залежати від напрямку променя антени телескопа (див. рис. 2 статті [1]), і, оскільки в процесі спостережень промінь весь час необхідно перенаправляти через обертання Землі, в принципі її розрахунок необхідно повторювати після кожного переміщення променя антени. Крім того, АЧХ зазвичай має досить складну форму, що ускладнює застосування простих (наприклад, поліноміальних) апроксимуючих функцій при її обчисленні та подальшому видаленні.

3. Введення порога, що розділяє корисні сигнали та завади, вираженого в одиницях, які визначаються статистичними характеристиками (наприклад, $\pm 3\sigma$ по відношенню до середнього значення).

Потім канали з завадами видаляються з розгляду, і процедура розрахунку моментів повто-

рюється, поки алгоритм виявляє канали, що перевищують поріг. Зазначимо, що одночасна наявність завад і потужних сигналів досліджуваних джерел в оброблюваних динамічних спектрах істотно впливає на статистичні характеристики, що розраховуються, і вибір конкретного порогового значення, яке розділяє завади й сигнали, є окремим, досить складним завданням. Оптимальні значення порога можуть сильно залежати як від характеристик об'єкта, що спостерігається, так і від рівня та морфології завадових сигналів. Етапи 2 і 3, як правило, мають використовуватися ітеративно, доки в ансамблі розрахованих індикаторів не залишиться значень, що перевищують поріг. Додамо, що вибір порогового значення є окремою проблемою, пов'язаною також з необхідністю введення додаткових методів оцінювання якості виробленого поділу частотних каналів на групи вільних від завад і тих, що їх містять.

2. Вирівнювання спектрів і гістограми максимумів

Як зазначено в попередньому розділі, на другому кроці процедури виявлення вузькосмугових завад (і це є іманентною частиною розробленого методу) необхідно провести локальне вирівнювання спектра. Воно полягає в усуненні залежності амплітудної характеристики приймальної системи (зазвичай нелінійної) від частоти, яка, у разі її ігнорування, призводить до залежності результату розрахунків взаємного розташування максимумів на площині частота—час від нахилу АЧХ, що спостерігається, в обраній при скануванні смузі частот. Характерний фрагмент спектрограми спостережень сигналів Юпітера, обмежений порівняно вузькою смугою частот 0.5 МГц, яка використовується при частотному скануванні, що обговорюється в наступних розділах, наведено на рис. 1. Ліва та права половини наведених діаграм містять інтервали динамічного спектра до та після видалення горизонтальних ділянок, що відповідають завадам. Практично всі ділянки, позначені як завади, швидше за все, є такими. Слабкий (можливо, завадовий) сигнал близько 17.55 МГц не виявлено запропонованим алгоритмом через маскування сигналом Юпітера. Статистичний аналіз даної ділянки методами,

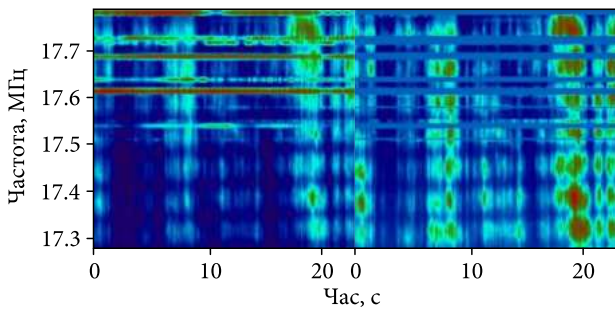


Рис. 1. Ділянка спектрограми для демонстрації ефективності запропонованого методу виявлення вузькосмугових завад. Половина ліворуч — вихідний динамічний спектр, праворуч — той самий спектр, але з видаленими ділянками, ідентифікованими як завади з допомогою методу ортогонального виявлення

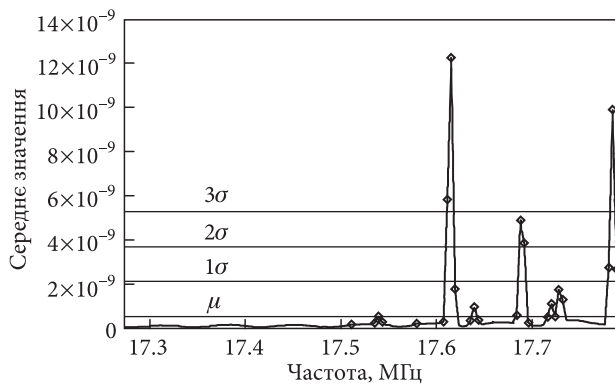


Рис. 2. Фрагмент ансамблю середніх значень (лінійна шкала), розрахованих у кожному вузькосмуговому (4 кГц) каналі в інтервалі ~ 22.8 с, для смуги частот шириною 0.5 МГц, що містить значну кількість вузькосмугових завад (див. спектрограму на рис. 1)

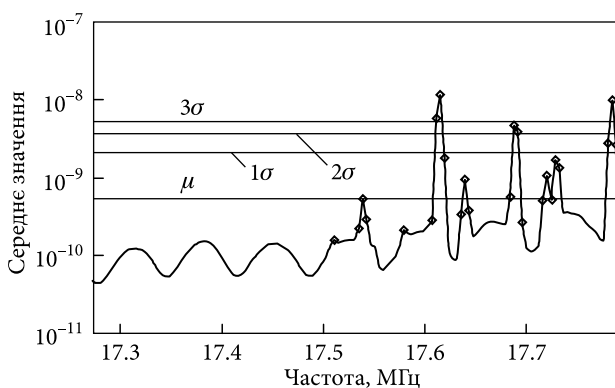


Рис. 3. Те саме, що зображено на рис. 2, але в логарифмічному масштабі по осі ординат

що раніше використовувалися, проілюстровано на рис. 2—4, у той час як ортогональне виявлення, пропоноване в даній роботі, відповідає графікам рис. 5, 6. Просте візуальне дослідження

свідчить про відсутність навіть поодиноких випадків хибного виявлення завад, тобто практично всі частотні канали, позначені маркерами на рис. 2—4, дійсно є завадами, часто такими, які не виявляються іншими методами.

На рис. 2 наведено графік середніх значень, розрахованих у кожному частотному каналі смуги частот, зображеної на рис. 1. Маркерами позначено частотні канали, які ідентифіковано як такі, що містять завади, за допомогою методу ортогонального виявлення. На рис. 2 горизонтальними лініями показані середнє значення μ та рівні $1, 2, 3\sigma$, розраховані для цього інтервалу частот. Для отримання більш ясної картини взаємного розташування пікових значень і статистичних рівнів, які часто використовуються при аналізі, на рис. 3 наведено ту ж діаграму, але в логарифмічному масштабі. Фарадеївське обертання площини поляризації радіовипромінювання Юпітера призводить до майже періодичної модуляції фонового рівня, що майже непомітно на рис. 2, виконаному в лінійному масштабі. Зрозуміло, що наявність потужних завад, а також майже періодичної модуляції значень, викликаної відгуком лінійно-поляризованого вібратора УТР-2 на фарадеївське обертання площини поляризації радіохвиль Юпітера в земній іоносфері [2], ускладнює поділ каналів на «нормальні» та ті, що містять завади. Використання інших функцій для масштабування значень, наприклад, обчислення середніх значень і величин σ у логарифмічному масштабі замість лінійного [3], не призводить до суттєвого спрощення цього завдання (див. рис. 4), оскільки деякі з частотних каналів, ідентифікованих згодом запропонованим алгоритмом як ті, що містять завади, перебувають у проміжку між середнім значенням μ і, наприклад, рівнем $\mu + \sigma$. Це ілюструє неефективність багатьох методів, що використовувалися раніше, заснованих на завданні порогових значень, виражених моментами першого і другого порядку.

Процедура вирівнювання спектра так само необхідна в даному алгоритмі, як і в класичному підході, описаному в Розд. 2. Ефективне виявлення вузькосмугових завад вимагає побудови кривої, що апроксимує усереднений за часом спектр, але у порівняно вузькому частотному інтервалі, який використовується на кожному кроці частотного сканування. Найчастіше для

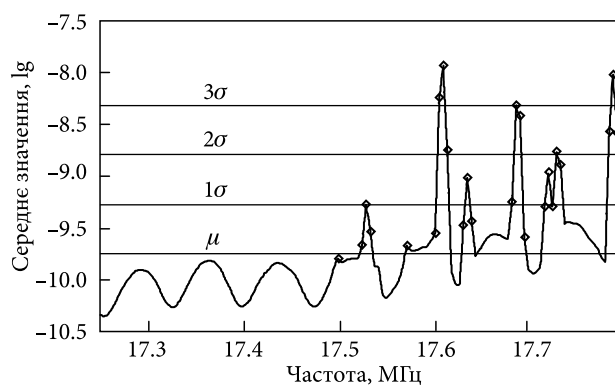


Рис. 4. Той самий фрагмент ансамблю середніх значень, як і наведений на рис. 2 і 3, для якого обчислення середнього значення та рівнів середньоквадратичних відхилень теж проводилися в логарифмічному масштабі

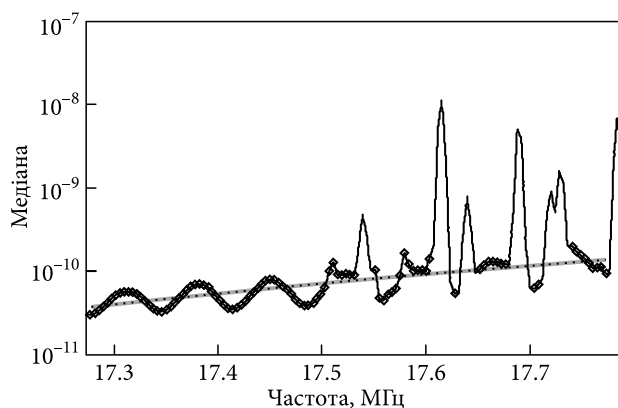


Рис. 5. Інтерполяція обраної ділянки спектра квадратичним поліномом при використанні 80 % частотних каналів, розташованих у порядку зростання значень медіани. Похила лінія — інтерполюючий поліном; крапки, що використовуються для його побудови, позначені маркерами

вирішення цього завдання можна використовувати поліноміальну апроксимацію другого порядку (параболічну інтерполяцію), використовуючи середні (або медіанні) значення в кожному частотному каналі як вхідні дані. За наявності в даному інтервалі великої кількості завад просте застосування поліноміальної інтерполяції часто призводить до значного відхилення кривої, яка інтерполює, від форми істинної АЧХ, тому з процесу побудови цієї кривої необхідно виключити (наскільки можливо) частотні канали, зайняті завадами. Тут ми зіштовхуємося з протиріччям, оскільки процедура вирівнювання спектра має проводитися на початковому етапі, тобто до того, як проводиться виявлення частотних каналів, зайнятих завадовими сигналами. Для подолання зазначеного протиріччя пропонується

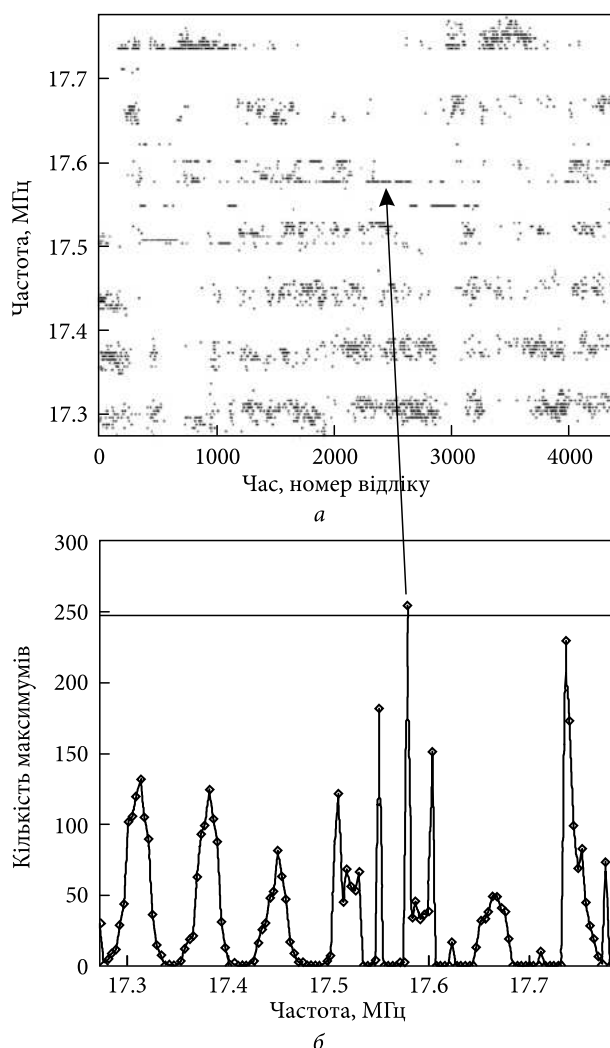


Рис. 6. Ілюстрація останнього кроку ітераційної процедури виявлення вузькосмугових завад: положення максимумів у напрямі осі частот на площині час—частота (а); гістограма положень максимумів, де горизонтальною лінією позначено емпірично підібраний поріг, що розділяє частотні канали на дві групи (ті, що містять завади, та вільні від них) (б)

запровадити додатковий параметр — певну максимальну кількість зайнятих завадами каналів у цьому частотному інтервалі. В обчисленнях, наведених у даній роботі, емпіричний вибір становить 20 % (тобто ми вважаємо, що як мінімум ~ 80 % частотних каналів в аналізованому інтервалі частот вільні від завад і можуть бути задіяні для розрахунку середнього спектра). На рис. 5 наведено приклад побудови апроксимуючої параболи вказаним вище способом.

Подальше застосування ітераційної процедури ідентифікації каналів із завадами (кроки 4, 5, описані в Розд. 4) показано на рис. 6, що відпо-

відає останньому кроку ітерацій порогового виявлення завад. Рис. 6, а являє собою площину час—частота, на яку нанесено крапки в тих місцях, де виявлено максимуми спектра в ділянці, що аналізується, для кожного кроку за часом. Таким чином, загальна кількість крапок на наведеної площині дорівнює кількості кроків за часом. На рис. 6, б наведено гістограму, що апроксимує розподіл крапок за частотою, і порогова лінія, яка використовується для визначення положення каналів, що містять завадовий сигнал. Стрілка вказує на горизонтальне згущення крапок панелі а, що призводить до утворення максимуму, який перевищує заданий поріг, ідентифікованого як останній з виявлених каналів із завадою. На кожному етапі ітерацій канали, що містять заваду, видаляються з розгляду. Зазначимо, що навіть багаторазове видалення таких «завадових» каналів не призводить до зменшення кількості крапок даних, які використовуються при побудові гістограм, оскільки кількість крапок даних визначається кількістю кроків за часом, а не кількістю частотних каналів, що залишаються після видалення.

3. Метод видалення вузькосмугових завад на фоні потужних корисних сигналів: алгоритм ортогонального виявлення

Для ілюстрації ефективності запропонованого нового методу та порівняння його з застосовуваними раніше підходами проаналізуємо у всій смузі частот $\sim 8 \dots 32$ МГц обраний фрагмент запису радіовипромінювання Юпітера від 10 квітня 2020 року, коли велика кількість вузькосмугових завад, розташованих у нижній частині спектра, перекривається за частотою з корисним сигналом (див. рис. 7). Всю смугу спостережень ($8.3 \dots 32.3$ МГц) зображено на рис. 7, а, його розтягнуті за частотою нижня $\frac{1}{2}$ ($8.3 \dots 20.3$ МГц; рис. 7, б) та $\frac{1}{4}$ частина ($8.3 \dots 14.3$ МГц; рис. 7, в), відповідно. На частині рис. 7, в, що відповідає розтягнутій по частоті спектрограмі, чітко видно всі характерні типи завад, присутні на даному часовому інтервалі: іоносферні станції (дрейфуючі за частотою, похилі лінії), вузькосмугові сигнали (горизонтальні смуги), імпульсні широкосмугові, нестационарні вузькосмугові сигнали

(деякі з них обведено червоним овалом). Така ситуація, хоч і не є типовою в радіоспостереженнях Юпітера, але зустрічається досить часто, особливо у випадку випромінювання джерела на південному полюсі Юпітера Іо-С (через меншу напруженість магнітного поля Юпітера на ньому [4]), коли його смуга випромінювання спостерігається в низькочастотній частині декаметрового спектра.

Характерними властивостями численних завад, присутніх на наведеному на рис. 7 динамічному спектрі, є широкий динамічний діапазон цих сигналів, а також їхня морфологічна різноманітність. Перша з цих властивостей призводить до того, що для ефективної візуалізації та подальшого видалення завад необхідно ввести процедури масштабування як у частотній, так і в часовій області. Отже, наприклад, з візуального аналізу спектрів, наведених на рис. 7, багато завад, що є практично невидимі на рис. 7, а, стають яскраво виділеними при розтягуванні динамічного спектра в частотній області (див. рис. 7, б, в) і, отже, можуть бути виявлені як досвідченим спостерігачем, так і спеціально розробленим алгоритмом.

Присутність потужної завади, сконцентрованої в якійсь порівняно компактній частотно-часовій області, призводить до «засвічування» (зменшення контрасту малоінтенсивних сигналів) аналізованої ділянки динамічного спектра та «невидимості» великої кількості менш потужних завад, розташованих у тій самій смузі частот, а також корисного сигналу, що присутній у спектрограмі. Процедура вирівнювання сильно неоднорідного спектра, наприклад, такого, який зображено на рис. 7, а, є окремою проблемою через суттєвий вплив як завад, так і потужних корисних сигналів на розраховану складну форму нелінійної функції АЧХ приймальної системи.

Розроблений алгоритм полягає у наступних кроках.

1. На попередньому етапі необхідно видалити з розгляду завадові сигнали, в основному зумовлені іоносферними станціями та перенаправленням антенної системи (див. статтю [1]).

2. Далі пропонується розбити весь досить широкий аналізований діапазон частот на порівняно вузькі смуги, що перекриваються, і проводити

пошук завад у кожній з них, покроково скануючи таким чином всю смугу аналізу. У подальших обчисленнях використовується ширина смуги аналізу ~ 0.5 МГц, що зсувається на кожному кроці на ~ 250 кГц. Таке покрокове сканування дозволяє уникнути впливу нелінійних спотворень при поліноміальній апроксимації АЧХ, оскільки в порівняно вузькому діапазоні частот можна використовувати досить просту форму апроксимуючої функції, таку як лінійна або квадратична. На кожному кроці сканування проводиться вирівнювання АЧХ будь-яким із методів, що застосовувалися в класичному підході. Тут, мабуть, найбільш ефективною є методика, що використовує квантілі розподілу середніх значень або медіан розподілів для амплітуд у кожному частотному каналі, що дозволяє уникнути крайових ефектів при інтерполяції з нерівномірно розташованими вузловими точками.

3. Кожен крок сканування включає знаходження максимального значення в кожному миттєвому спектрі та запам'ятовування його положення на шкалі частот. Результатом цього кроку для масиву $y(1:N,1:q)$, де q — це кількість частотних каналів у виділеній смузі частот, є одновимірний масив $Mx(1:N)$, що містить значення індексу в інтервалі $[1:q]$, де було виявлено максимум. Ще раз відзначимо, що положення максимуму фіксується у напрямку осі частот, а кінцевий масив Mx містить точки, розподілені у часі. Завдяки такому «ортогональному» підходу вдається в багатьох випадках уникнути випадків пропуску або невидання слабких вузькосмугових завадових сигналів, які маскуються більш потужним сигналом космічного джерела.

4. Далі будується гістограма значень масиву Mx і встановлюється граничне значення, перевищення якого фіксується як завада і означає необхідність видалення відповідного частотного каналу для подальшого аналізу. Такий підхід було використано нами в роботі [1] для виявлення лінійно дрейфуючих за частотою сигналів станцій іоносферного зондування. Відмінність полягає в тому, що хоча для іоносферних станцій також відбувається пошук пікових значень у таких гістограмах, але перед розрахунком гістограми проводиться поворот площини час–частота, чим враховується частотна модуля-

ція цих сигналів. У разі вузькосмугових стаціонарних завад обертання зазначеної площини не потрібно, оскільки максимумами вишиковуються вздовж горизонтальних ліній, що відповідають заваді. Зрозуміло, що максимальна смуга завади може регулюватися додатковим параметром, який задає ширину відповідних смуг при побудові гістограм, проте для обраного фрагмента спостережних даних ітеративне застосування цього методу призводить до високоефективного придушення навіть порівняно широкосмугових завад (див. рис. 9, δ).

5. Наступний крок є повторенням кроків 3 і 4 після видалення з розгляду частотних каналів, позначених як «завада» на кроці 4. Ітерації повторюються доти, поки в гістограмі значень масиву Mx не залишиться величин вище встановленого порога або якщо кількість усунутих частотних каналів не перевищить інше, спеціально встановлене раніше граничне значення (наприклад, не більше ~ 40 % частотних каналів можуть вважатися завадовими, що, в принципі, відповідає ідеології розподілу смуг радіочастот Міжнародною спілкою радіочастот, яка дозволяє працювати передавачам у локальній точці простору тільки «через канал», тобто залишає між використовуваними для радіозв'язку смугами приблизно такий же за розміром «чистий» діапазон частот). Зазначимо, що при такій послідовності кроків ітераційної процедури ефективно видаляються ті частотні канали, максимумами яких займають порівняно вузьку смугу частот, а не ті, які мають порівняно велике значення амплітуди, але не досягають максимуму весь час при тому самому значенні частоти. Це призводить до можливості видаляти завади, але не видаляти більш широкосмугові сигнали, викликані, наприклад, фарадеївським обертанням площини поляризації радіохвиль Юпітера.

Зрештою, кроки 3–5 завершуються для всіх частот, оскільки на останньому кроці сканування не залишається частотних каналів, що ідентифікуються як завада. На виході даної процедури ми маємо список каналів, де були виявлені завади хоча б в одному з двох випадків аналізу тих самих частот, що досягається в результаті дворазового сканування аналізованого діапазону за рахунок 50 % перекриття смуг за частотою.

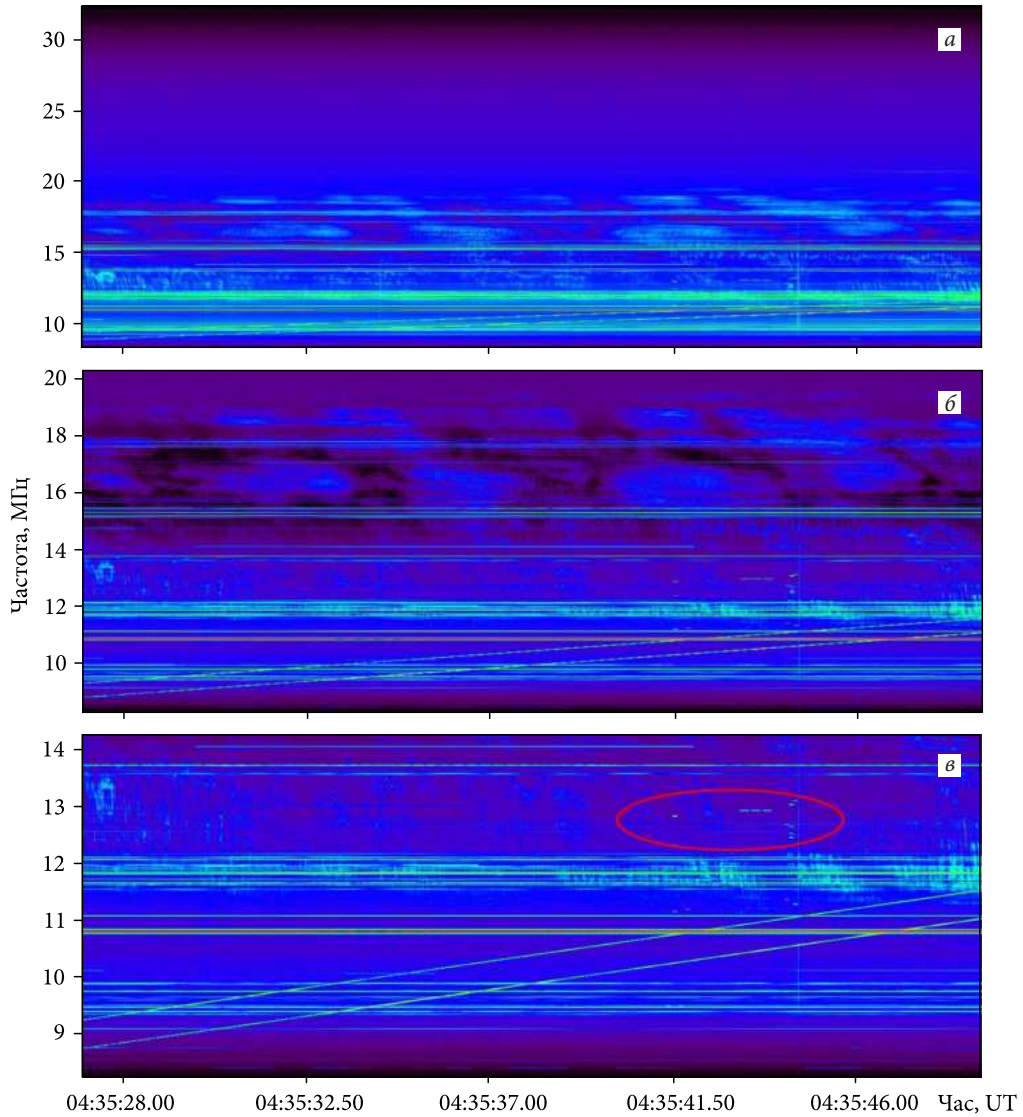


Рис. 7. Фрагмент динамічного спектра сигналу Юпітера під час бурі Іо-С на фоні завад; *a* – вся смуга спостережень (8.3...32.3 МГц), *б* і *в* – розтягнуті за частотою нижня $\frac{1}{2}$ (8.3...20.3 МГц) та $\frac{1}{4}$ (8.3...14.3 МГц) частини спектра відповідно

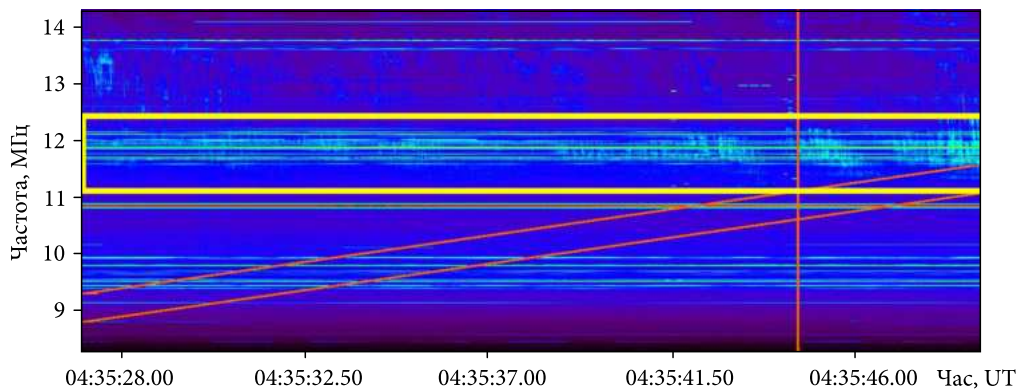


Рис. 8. Виявлення потужних коротких (вертикальна червона лінія) і дрейфуючих за частотою (похилі червоні лінії) імпульсів на динамічному спектрі, наведеному на рис. 7, *в*. Жовтою рамкою обведено область, що проілюстровано на рис. 9, *a–г*

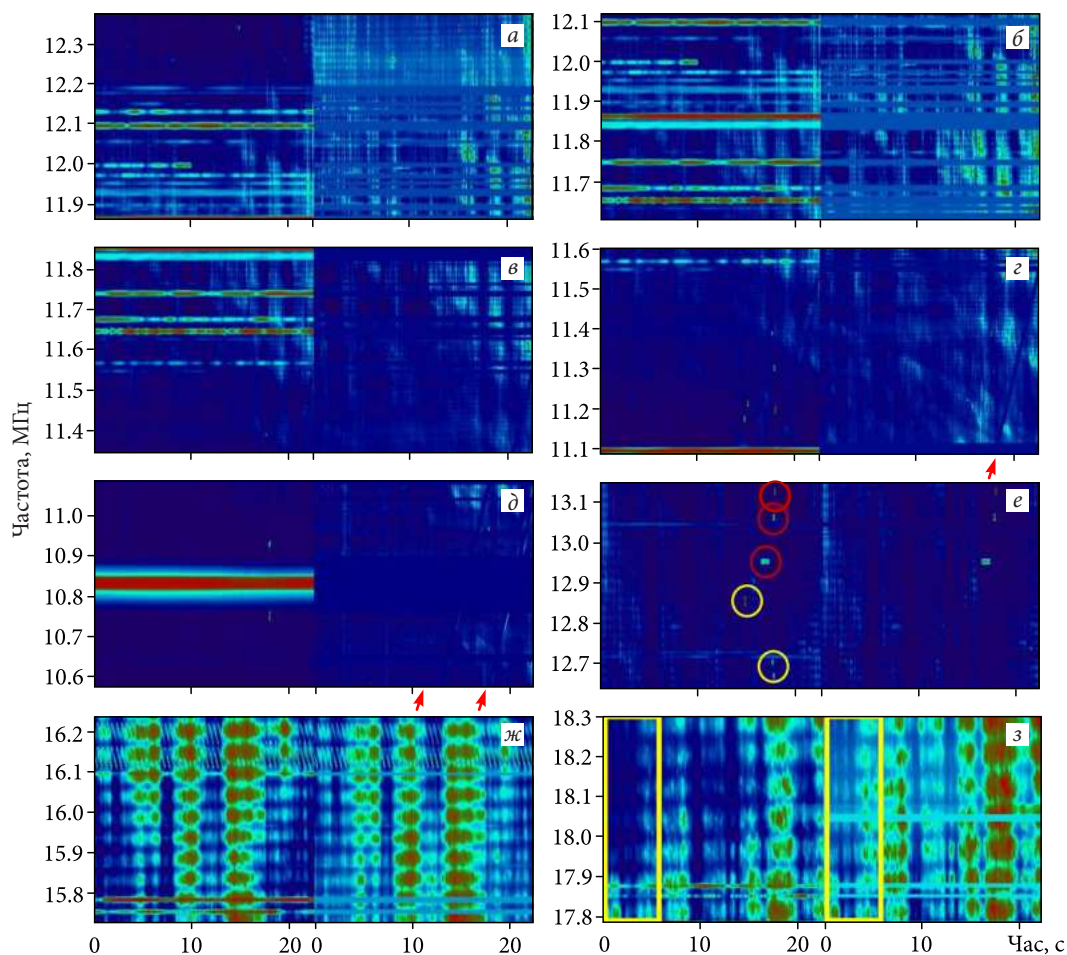


Рис. 9. Приклади видалення завад. Панелі *a–г*: очищення від завад інтервалу частот 11...12.5 МГц чотирма послідовними кроками сканування за частотою смуг по ~ 0.5 МГц (крок ~ 0.25 МГц); *д* – видалення відносно широкосмугової потужної завади; *е* – видалення нестаціонарної вузькосмугової завади; *ж* – високоефективне очищення від завад ділянки спектра, що містить досить потужну компоненту радіовипромінювання Юпітера; *з* – видалення низькоінтенсивної завади складної форми (детально – на рис. 10). На панелях *г* і *д* червоними стрілками позначено видалені на попередньому етапі аналізу [1] сигнали станції іоносферного зондування

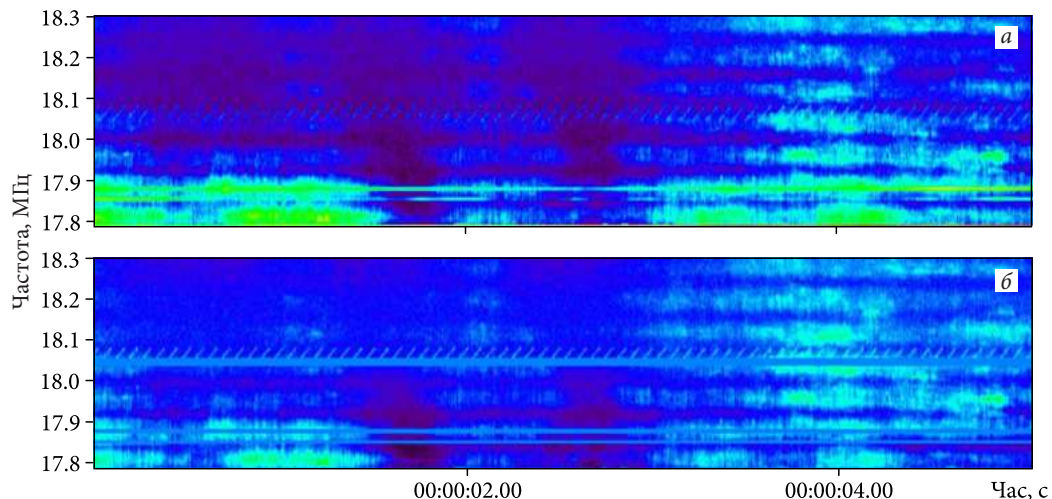


Рис. 10. Сильно розтягнуті у часі фрагменти рис. 9, з до (а) та після (б) застосування алгоритму виявлення та видалення вузькосмугових завад

Параметр перекриття можна змінювати, проте його збільшення призводить до пропорційного зростання витрат комп'ютерного часу, а зменшення — до збільшення кількості невиявлених завадових каналів. Ми вважаємо, що для досліджуваного випадку динамічного спектра, наведеного рис. 7, значення 50 % є близьким до оптимального.

Далі детально зупинимося на покроковому застосуванні запропонованого алгоритму аналізу динамічного спектра, наведеного на рис. 7, *в*. На початковому кроці алгоритму, описаному в роботі [1], у даному спектрі виявлено одну вертикальну лінію, що асоціюється з перенаправленням антенної системи або потужним широкосмуговим завадовим імпульсом, а також двох послідовно згенерованих лінійно дрейфуючих ліній від іоносферної станції (рис. 8). Жовтою рамкою обведено область, що проілюстровано на рис. 9, *а—г* і яка становить найбільший інтерес, оскільки в ній перетинається область інтенсивного радіовипромінювання Юпітера з великою кількістю вузькосмугових завад. Результат застосування наступних кроків процедури, що включає сканування за частотою, вирівнювання АЧХ, побудову гістограм положення точок максимуму та ітеративне видалення частотних каналів, які відповідають пікам на гістограмах, показано на рис. 9. Послідовні кроки 2—5 процедури боротьби з завадами, спрямовані на виявлення горизонтальних ліній, ведуть до поділу динамічних спектрів на горизонтальні ділянки без завад та смуги, заповнені синім фоновим кольором, що збігаються з завадами. Ліва та права половини кожної з наведених діаграм відповідають спектрограмам до і після видалення завад відповідно. Довжина інтервалу часу наведених на рис. 9 динамічних спектрів така сама, як і на рис. 7, але частотний діапазон сильно розтягнутий. Рис. 9, *а—г* ілюструють процедуру частотно-го сканування за частотою смуги ~ 0.5 МГц (50 % перекриття, крок ~ 0.25 МГц) та відповідають їй декільком послідовним крокам. Кожну з панелей розбито навпіл у горизонтальному напрямку — до (ліворуч) та після (праворуч) видалення вузькосмугових завад. Для покращення контрастності та забезпечення доброї помітності сигналів Юпітера шкала часу є стиснутою в кілька разів порівняно з рис. 7, 8. На панелях *г* і *д* помітні та-

кож похилі лінії (позчені червоними стрілками), що відповідають сигналам станції іоносферного зондування, які видалені на попередньому етапі аналізу [1]. Стиснення за часом призвело до сильної зміни нахилу цих ліній порівняно з рис. 7, 8. Зазначимо, що у верхній ($f > 12.2$ МГц) частині діаграми, наведеної праворуч на рис. 9, *а*, стали помітні смуги сигналу Юпітера, створені фарадеївським обертанням площини поляризації радіохвиль. Оскільки дані смуги випромінювання сильно зашумлені, їх не виявлено алгоритмом усунення завад, бо вони не формують основних піків у гістограмі максимальних значень, що використовується для розрізнення сигналів. Основні піки, що відповідають завадовим сигналам, формуються значно нижче за частотою ($f < 12.2$ МГц).

Рис. 9, *д* дає приклад видалення порівняно широкосмугової завади. Добре видно, що смуга частот із завадою у половині праворуч значно ширша, ніж смуга, яка «має вигляд завади» в половині рисунка ліворуч, що демонструє високу надійність застосовуваного ітеративного алгоритму, незважаючи на те, що амплітуда завади змінюється у широкому діапазоні значень. Зауважимо також, що у верхньому куті праворуч даної спектрограми стає наявною ділянка з підвищеною яскравістю, що містить радіосигнал Юпітера, який не помітно на половині ліворуч даної діаграми до видалення потужної завади в центрі даної смуги частот. Рис. 9, *е* ілюструє, що даний алгоритм частково видаляє короткі ділянки, які відповідають сильно нестаціонарній вузькосмуговій заваді, однак вимагає доопрацювання для їхнього повного видалення. Жовтими колами позначено видалені завади, а приклади невидаленого сигналу обведено червоним. Рис. 9, *ж* демонструє високу ефективність запропонованого методу для ділянки спектра, що містить поряд із завадами досить потужну компоненту радіовипромінювання Юпітера. Зазначимо, однак, що специфічні завадові сигнали між 16.10 і 16.25 МГц, які є короткими імпульсами з негативним частотним дрейфом, не виявляються даним алгоритмом і вимагають створення спеціальних додаткових методів для їхнього видалення. У той же час потужність таких сигналів не є високою в порівнянні з сигналом Юпітера, тому їхнє видалення необхідне тільки при детальному аналі-

зі динамічних спектрів з високою частотно-часовою роздільною здатністю. Тут ми стикаємося зі специфічною проблемою неуніверсальності алгоритмів боротьби з завадами під час аналізу динамічних спектрів із різною частотно-часовою роздільною здатністю. Інакше кажучи, оскільки жоден алгоритм не може видалити всі можливі завади, при створенні зручних для візуального аналізу кольорових діаграм динамічних спектрів рекомендується використовувати ті алгоритми, які пригнічують зорове сприйняття завад при даній роздільній здатності.

Рис. 9, з містить приклад виявлення завади (поруч з частотою 18.05 МГц), коли вона здається відсутньою. Хибні виявлення — це також характерна властивість алгоритмів боротьби з завадами, оскільки пропонувані для розрізнення завад і корисних сигналів статистичні індикатори ніколи не є ідеальними і не спрацьовують тільки в необхідних випадках. Цікаво, однак, відзначити, що в даному випадку ми маємо справу не з хибним виявленням. На рис. 10 наведено збільшені фрагменти рис. 9, з, позначені жовтими прямокутниками, з якого випливає, що тут має місце завада більш складної форми (послідовність коротких імпульсів з позитивним частотним дрейфом), що займають порівняно вузьку смугу в порівнянні зі схожою завадою на рис. 9, ж, яка не є помітною на рис. 9, з через недостатність часової роздільної здатності. Пропонований алгоритм виявляє заваду, однак через те, що даний сигнал має складний імпульсний характер та порівняно невисоку інтенсивність близько до частоти 18.05 МГц, видаляє лише частину «забрудненої» смуги частот. Вузькосмугові завади навколо частот 17.855 і 17.880 МГц видалено, як і передбачає застосування запропонованого алгоритму.

4. Обговорення

Зазначимо, що описаний вище підхід може бути застосовано лише у разі, якщо завада присутня в аналізованій ділянці протягом досить тривалого часового інтервалу. Необхідність усунення вузькосмугових завад сильно нестаціонарного характеру, коли завадовий сигнал лише зрідка присутній у порівняно вузькому частотному каналі, вимагає розробки спеціальних алгоритмів

виявлення, заснованих на суттєвій модифікації параметрів вихідної спектрограми, таких як її сильне стиснення та/або розтягування в часі або використання інших методів, таких як, наприклад, порогове підсумовування [5].

Хоча застосування запропонованого методу детально розглянуто лише для одного випадку аналізу сигналу Юпітера, складна морфологія частотно-часових структур і широкий динамічний діапазон досліджуваних сигналів, характерні для декаметрових радіобур вказаного об'єкта, дозволяє припустити його ефективність і для інших джерел потужного випромінювання, таких як Сонце та деякі пульсари. З іншого боку, використання даного алгоритму для видалення завад при пошуку слабких корисних сигналів, таких, наприклад, як радіовипромінювання екзопланет або рекомбінаційних радіоліній, бачиться досить багатообіцяючим, хоча і вимагає деякого тонкого налаштування параметрів, що керують пороговими значеннями, які розділяють завади та сигнали.

Зрозуміло, запропонована методика не є універсальним алгоритмом, що дозволяє ефективно усунути завади будь-яких типів на частотно-часовій площині. Її застосування необхідно комбінувати з розробленими раніше підходами, такими як, наприклад, вирівнювання фонових спектра за допомогою апроксимації АЧХ поліномами невисокого порядку, сканування за частотою з покроковим використанням порівняно неширокої смуги для аналізу, порогове підсумовування спільно з масштабуванням у часі та частоті для суттєво нестаціонарних джерел і т. п.

Деякі важливі аспекти боротьби з завадами в рамках запропонованого алгоритму залишаються недослідженими і вимагають значних подальших зусиль. Зокрема, у роботі відсутній детальний статистичний аналіз ефективності даного підходу. Залишається відкритим питання про відсоткове співвідношення каналів із завадами, які не було виявлено в процесі обчислень із використанням алгоритму, що обговорюється, а також каналів із корисним сигналом, ідентифікованих як завадові. Крім того, у роботі не приділено увагу проблемі представлення кінцевих результатів у вигляді спектрограм, вільних від завад. Іншими словами, практично немає обговорення питання про інтерполяцію або заміну фрагмен-

тів динамічного спектра, значна частина якого може бути ідентифікована як завада. Завдання ефективного представлення кольорових діаграм на фінальному етапі роботи також вимагає спеціального дослідження [6].

Висновки

Новий метод видалення завад із спектрограм космічних джерел, отриманих із високою частотно-часовою роздільною здатністю, який запропоновано в роботі [1], успішно застосовано до завад вузькосмугового типу, що найчастіше зустрічаються й істотно впливають на процеси обробки, інтерпретації та побудови фізичних моделей великої кількості космічних об'єктів.

Видалення описаним методом потужних широкосмугових завад, сигналів станцій похилого

іоносферного зондування [1] та вузькосмугових завад, не втрачаючи інформації про тривалі сигнали помірної потужності, які додатково несуть поляризаційну інформацію (L-випромінювання), значно поліпшує результуючі очищені від завад дані порівняно з методами статистичної обробки, які спрямовано на аналіз кожного каналу окремо. Тому, незважаючи на поки що обмежений проаналізований об'єм спостережень, запропонований метод має хороші перспективи удосконалення та застосування при вивченні різних типів радіоастрономічних об'єктів.

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

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Рябов В.Б., Захаренко В.В., Харланова В.Ю. Усунення 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. DOI: 10.15407/rpra29.01.03
2. Warwick J.W., Dulk G.A. Faraday Rotation on Decametric Radio Emissions from Jupiter. *Science*. 1964. Vol. 145, Iss. 3630. P. 380–383. DOI: 10.1126/science.145.3630.380
3. Mauduit E., Zarka P., Lamy L., and Hess S. L. G. Drifting discrete Jovian radio bursts reveal acceleration processes related to Ganymede and the main aurora. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14, Iss. 5981. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41467-023-41617-8
4. Connerney J.E.P., Timmins S., Oliverson R.J., Espley J.R., Joergensen J.L., Kotsiaros S., Joergensen P.S., Merayo J.M.G., Hecceg M., Bloxham J., Moore K.M., Mura A., Moirano A., Bolton S.J., and Levin S.M. A new model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's prime mission. *JGR Planets*. 2022. Vol. 127, e2021JE007055. P. 1–15. DOI: 10.1029/2021JE007055
5. Offringa A.R. *Algorithms for radio interference detection and removal*. 2012. PhD Thesis Mathematics and natural sciences. Univ. of Groningen. 212 p.
6. Zeller S., and Rogers D. Visualizing science: How color determines what we see. 2020. *Eos*. Vol. 101. DOI: 10.1029/2020EO144330

Стаття надійшла 22.12.2023

REFERENCES

1. 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. DOI: 10.15407/rpra29.01.03
2. Warwick, J.W., Dulk, G.A., 1964. Faraday Rotation on Decametric Radio Emissions from Jupiter. *Science*, **145**(3630), pp. 380–383. DOI: 10.1126/science.145.3630.380
3. Mauduit, E., Zarka, P., Lamy, L., and Hess, S.L. G., 2023. Drifting discrete Jovian radio bursts reveal acceleration processes related to Ganymede and the main aurora. *Nature Commun.*, **14**(5981), pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41467-023-41617-8
4. Connerney, J.E.P., Timmins, S., Oliverson, R.J., Espley, J.R., Joergensen, J.L., Kotsiaros, S., Joergensen, P.S., Merayo, J.M.G., Hecceg, M., Bloxham, J., Moore, K.M., Mura, A., Moirano, A., Bolton, S.J., and Levin, S.M., 2022. A new model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's prime mission. *JGR Planets*, **127**, e2021JE007055. pp. 1–15. DOI: 10.1029/2021JE007055
5. Offringa, A.R., 2022. *Algorithms for radio interference detection and removal*. PhD Thesis. Mathematics and natural sciences. Univ. of Groningen. 212p.
6. Zeller, S., and Rogers, D., 2020. Visualizing science: How color determines what we see. *Eos*, **101**, DOI: 10.1029/2020EO144330

Received 22.12.2023

V.B. Ryabov¹, V.V. Zakharenko^{2,3}, V.Yu. Kharlanova²

¹ Future University Hakodate

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

² Institute of Radio Astronomy NAS of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

³ V.N. Karazin Kharkiv National University

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

MITIGATING THE INTERFERENCE IN DYNAMIC SPECTRA
IN THE PRESENCE OF POWERFUL SIGNALS
Part 2. NARROWBAND INTERFERENCES
OF CONDITIONALLY STATIONARY CHARACTER

Subject and Purpose. A new method for detecting narrow band interferences is discussed, with the use of an example record of Jovian Io-C decametric radio storm as obtained with the UTR-2 array on April 10, 2020. We aimed at developing an efficient and simple algorithm based on a detailed analysis of the effect the radio interference environment and the frequency response of the telescope may have on the efficiency of the interference mitigation procedure.

Methods and Methodology. The 'orthogonal detection' method proposed for identifying linear interference patterns in dynamic spectra of powerful radio sources has been adapted for application to narrow band interferences of various spectral widths and variable brightness, which often happen to be located close to (or intersect with) the signal of interest. In order to minimize the impact of the telescope's frequency response, a discretized frequency-scanning technique is used, which permits a steady approximation of the averaged spectrum by low order polynomials, as well as removal of the frequency trend which hinders distinguishing between the low-level interference signals and those coming from the source.

Results. An efficient approach to the problem of detecting long lasting, narrowband interferences in dynamical spectra (conditionally stationary interferences) is proposed. The algorithm has been tested on the example of a powerful storm of Jovian radio emission. The proposed technique can be especially useful in situations where the signal of interest overlaps with the interference in the time-frequency domain.

Conclusions. The new approach to the problem of interference mitigation, based on the development of combined algorithms of signal separation in the time-frequency domain, has been shown to offer an effective method of signal processing. In contrast to the previously used methods based on calculation of statistical moments for amplitudes, the new approach allows avoiding use of the same statistical indicators for both interference detection and subsequent steps of data analysis intended for building physical models and interpreting the observational data.

Keywords: narrow-band interferences, Jovian S- and L- emissions, statistical indicators, moments, UTR-2, digital signal processing, amplitude thresholding.