

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.268>
УДК 520.27+52-17

Л.О. Станиславський

Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, Харків, 61002, Україна
Email: lev.stanislavskiy@gmail.com

МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ НЕБАЖАНОГО ВПЛИВУ РАДІОЗАВАД НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

Предмет і мета роботи. Наведено методи комп'ютерної обробки результатів радіоастрономічних спостережень у декаметровому діапазоні довжин хвиль. Метою роботи є поліпшення низки наявних методів очищення записів від радіозавад і використання їхньої комбінацій у частотно-часовій області, а також аналіз їхніх відносних переваг і недоліків.

Методи та методологія. У записах результатів радіоастрономічних спостережень поряд із сигналами від космічних джерел радіовипромінювання зазвичай є помітним внесок різноманітних радіозавад. Спираючись на знання типів завад та їхнього впливу на досліджувані сигнали на шляху їхнього поширення, розроблено процедури очищення радіосигналів від завад у площині частота—час, котрі поєднують різні підходи в залежності від типу космічного об'єкта.

Результати. Розроблені методи виділення космічних сигналів на тлі завад уможливають отримання унікальних даних щодо джерел такого радіовипромінювання. Відповідні програмні засоби дають можливість виявити дуже слабкі сигнали на тлі радіочастотних завад, а також дозволяють отримати параметри випромінювання, ґрунтуючись на найбільш статистично повному наборі подій.

Висновок. Продемонстровано ефективність розроблених процедур очищення радіосигналів від завад у площині частота—час. Втім, із результатів випливає, що універсального способу подолати наслідки дії будь-якої завади в реєстраціях радіоастрономічних спостережень не існує. Кожний метод може вимагати попереднього налаштування параметрів, від яких залежить інформативність аналізу фізичних характеристик радіовипромінювання в області його генерації. Використання зазначених методів може бути успішним, якщо радіосигнал від космічного джерела на реєстраціях виявляється лише помірно зіпсованим завадами.

Ключові слова: радіоастрономічні спостереження, процедури очищення даних від завад, частотно-часове представлення сигналу, УТР-2, ГУРТ.

Ц и т у в а н н я: Станиславський 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. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.268>

Citation: Stanislavsky, L.A., 2022. Methods of radio frequency interference mitigation on the stage of preliminary processing of received signals. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(4), pp. 268—283. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.268>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Як показує багаторічний досвід радіоастрономічних спостережень на українських радіотелескопах УТР-2, УРАН і ГУРТ [1–3], радіовипромінювання, що приймається у декаметровому діапазоні довжин хвиль, нарівні з сигналами космічних джерел, традиційно містить у собі помітний внесок різноманітних радіозавад. Завдяки їхній високій інтенсивності істотно ускладнюється процес спостережень, астрофізичних інтерпретацій і оцінки параметрів прийнятого випромінювання космічних об'єктів. Незважаючи на те, що природа багатьох завадових сигналів є відомою, походження деяких з них поки що не встановлено точно. Розвиток сучасних технологій в області засобів зв'язку та зростаючий рівень урбанізації неминуче погіршують умови проведення радіоастрономічних вимірювань. На сьогоднішній день моніторинг завадового оточення є нагальною й важливою задачею на радіоастрономічних обсерваторіях по всьому світу [4, 5]. Статистика завад за своєю природою має нестационарний характер, який залежить від часу доби, дня тижня, пори року, а також і від напрямку діаграми направленості антени радіотелескопа. У зв'язку з цим слід згадати, що декаметрові спостереження на гранично низьких (доступних для реєстрації) частотах проводяться фактично поблизу частоти іоносферного відсічення, величина якого залежить від стану сонячної активності. В денний період і за умов високої активності для спостережень вдень вона лежить у діапазоні 10...15 МГц, а за низької активності може опускатися й до 2 МГц. Внаслідок відбиття радіохвиль від іоносфери та поверхні Землі завадові випромінювання можуть поширюватись на великі відстані від своїх джерел, що негативно позначається на результатах радіоастрономічних спостережень.

Радіосигнали від космічних об'єктів найчастіше мають дуже низьку інтенсивність, порівняно з ними завади демонструють помітно більший відгук за величиною в інструменті для реєстрації радіовипромінювання.

В радіоастрономії різних частотних діапазонів існує два способи боротьби з цим небажаним фактором: апаратний і програмний. Обидва вони привертають величезну увагу в радіоастрономічних дослідженнях [6, 7]. Стосовно декаметрової

радіоастрономії, один з ефективних апаратних підходів боротьби із завадами — це просторова селекція сигналів із використанням великих антенних решіток. Крім того, виявляється корисною також надвисока лінійність застосовуваних антенних підсилювачів і багаторозрядність (14–16 біт для УТР-2, УРАН і ГУРТ) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) у цифрових приймачах. Це дозволяє, внаслідок великої потужності завад, уникнути появи комбінаційних частот у прийнятому сигналі. Те, що не вдається побороти апаратним способом, часто можна виправити за допомогою спеціально розроблених програм (алгоритмів) обробки радіоастрономічних даних. Саме про це йдеться в даній роботі, метою якої є надати сучасний погляд на методи попередньої обробки радіоастрономічних спостережень для мінімізації впливу радіозавад на результати вимірювань. Їхнє застосування дозволяє помітно підвищити результативність низькочастотних спостережень як з точки зору виявлення слабких сигналів космічних джерел, так і з встановлення їхньої тонкої структури. Незважаючи на те, що, зазвичай, спостерігачі космічного радіовипромінювання обізнані в деталях сучасного стану обробки записів, але використані методи обробки даних часто засновані на перевагах зі свого особистого, нерідко емпіричного вподобання. Цей процес удосконалення попередньої підготовки записів радіоастрономічних спостережень до безпосереднього аналізу астрофізичних ефектів триває постійно. Слід зазначити, що в деяких випадках комбінація таких методів дає можливість отримати більш якісні результати, що показано на прикладах обробки даних спостережень Сонця. Метою статті є створення комбінації вдосконалених методів очищення записів радіоастрономічних сигналів по найнижчій границі декаметрового діапазону для земних спостережень в найважчих завадових умовах. Особливої уваги також заслуговує аналіз особливостей і статистика появи самих завад, їхнє походження та джерела, але цей аспект не буде розглядатися в даній роботі.

1. Особливості реєстрацій радіоастрономічних спостережень

В епоху комп'ютерних технологій сучасна радіоастрономія успішно освоїла цифрові методи реє-

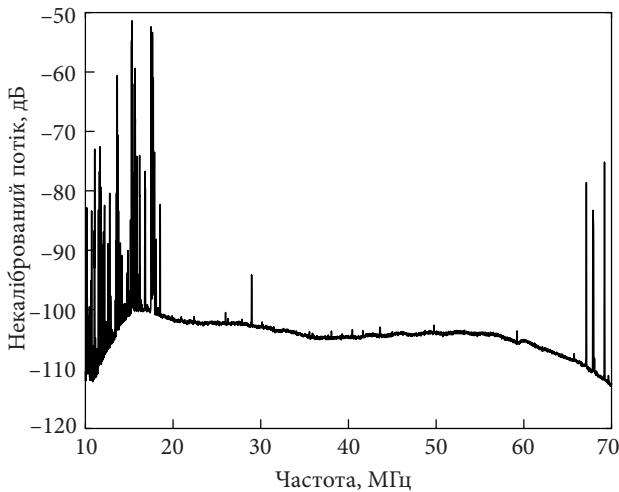


Рис. 1. Частотний профіль динамічного спектра радіовипромінювання за спостереженнями на радіотелескопі ГУРТ. Вертикальні викиди на спектрі – це радіоперешкоди

страції спостережень і цифрове управління фазованими антенними решітками. При цьому добре себе зарекомендувала гібридна схема побудови декаметрового радіотелескопа. Зокрема, такими є радіотелескопи УТР-2, УРАН і ГУРТ [1]. Вони використовують аналогову систему фазообертачів (що складаються з коаксіальних ліній різної довжини) для УТР-2, УРАН та окремих новостворених субрешіток ГУРТ разом із цифровим фазуванням таких субрешіток. Це дає можливість зробити інструмент простішим, менш витратним при виконанні, надійним і різноманітним по конфігурації в спостереженнях, що дозволяє керувати розміром антенного променя й ефективно провести апаратну чистку від просторово далеких завад. Як приймачі використовуються пристрої з повністю цифровою схемотехнікою [8, 9], яка включає в себе високоточні АЦП у поєднанні з програмованими логічними інтегральними схемами (ПЛІС), що дозволяють проводити швидко перетворення Фур'є прийнятого антеною сигналу і потім записувати його через певні інтервали часу на електронний носій. Такий вид реєстрації називається динамічним спектром, що має лінійні шкали за часом і частотою, але логарифмічну шкалу за інтенсивністю, щоб відображати широку динаміку прийнятого сигналу (багато порядків величини). Іншими словами, динамічний спектр показує еволюцію сигналу по частоті й часу, тобто являє собою двовимірну матрицю, значення елементів

якої визначають інтенсивність сигналу в даний момент часу (із заданою часовою роздільною здатністю) та в певному частотному каналі (для швидкого перетворення Фур'є частотний діапазон розбивається на однакові частотні інтервали, що кратні 2^n).

Стосовно приймача DSPZ (Digital Spectro-Polarimeter, type Z [8]) радіотелескопів УТР-2 і УРАН кількість частотних каналів становить 8192 в діапазоні 0...33 МГц при роздільній здатності 4 кГц і часі накопичення 0.25...128.0 мс. Цифровий приймач ГУРТ (який ще має назву ADR — Advanced Digital Receiver [9]) містить 16384 каналів для частот 0...80 МГц. Амплітудно-частотна характеристика цих радіотелескопів залежить від головного тракту прийому сигналів [1, 10], що має нерезонансний, рівномірно плоский вигляд зі слабким нахилом у бік високих частот (рис. 1). Нижні частоти інструментів УТР-2 і УРАН становлять приблизно 8.25 МГц, а для ГУРТ — 8 МГц. У такому випадку після проведення радіоастрономічних спостережень отримані експериментальні записи піддаються подальшій обробці з метою визначення частотно-часових, поляризаційних та інших властивостей сигналів, прийнятих від космічних об'єктів.

Ефективність цієї роботи істотно підвищується, якщо вдається провести селекцію початкового сигналу при помітній мінімізації внеску всіх інших компонентів (сигналів) прийнятого радіотелескопом випромінювання, де помітне місце займають радіозавади. І перше питання, що в зв'язку з цим виникає — який вигляд вони мають на динамічному спектрі прийнятого випромінювання в декаметровому діапазоні радіохвиль. Як виявляється, залежно від джерела завади по-різному. Майже завжди, особливо вдень, присутнє вузькосмугове випромінювання короткохвильових радіомовних станцій, що представляють на динамічному спектрі вузькі горизонтальні лінії на різних частотах. Грозові розряди, джерела яких можуть мати як місцевий характер, так і надходити із зон грозової активності нашої планети (зокрема, з екваторіальної зони), на динамічному спектрі являють собою вертикальні переривчасті лінії на частотах 8...14 МГц. Похилі вузькі лінії на динамічному спектрі виникають через прийом сигналів від іоносферних станцій. Періодично реєструються, у вигляді горизон-

тальних пунктирних вузькосмугових відрізків на спектрі, завади іншого типу, що пов'язані з роботою телетайпа. Значно рідше реєструються широкосмугові завади (спектри мають екзотичний вигляд, не схожий ні на один із відомих для космічних джерел), що походять, наприклад, від несправності систем запалювання транспортних засобів, коли останні пересуваються неподалік від антен радіотелескопа.

Цей далеко не повний перелік завод показує, наскільки непросто аналізувати записи прийнятого випромінювання на предмет виявлення нових, невідомих раніше космічних сигналів у реальних умовах радіоастрономічного експерименту. Оскільки часто в спостереженнях інтенсивність завод досить часто є значною, застосування простого підходу швидкого перегляду динамічних спектрів реєстрацій може виявитися малоефективним. У цьому випадку досить велика ймовірність пропуску шуканого сигналу — або через знижену контрастність зображення спектра (завада нівелює слабкі сигнали), або за рахунок часткового маскуванню події, що нас цікавить, шкідливим випромінюванням. Таким чином, «очищення» реєстрацій спектрів сигналів від проявів завод — одна з найважливіших задач обробки даних радіоастрономічних спостережень. Далі ми розглянемо методи, які можна застосувати для вирішення зазначеної проблеми.

2. Підготовка спектрів реєстрацій до виявлення проявів завод

Перед тим як проводити будь-яку процедуру усунення впливу радіозавод у реєстраціях, слід зазначити, що отримані дані мають базову поверхню, яка залежить від часу та частоти. Саме на ній розташовуються прийняті сигнали та завади, що нас зацікавили, у вигляді серії піків різної інтенсивності. Її зігнута форма характеризує апаратні особливості експерименту. Ця поверхня відображає робочу смугу інструменту, яка не може бути ідеально прямокутною. Вона залежить від зміни ефективної площини антени радіотелескопа в процесі стеження за джерелом космічного випромінювання. Для аналізу розташування завод на динамічному спектрі базову поверхню корисно зробити, спеціальною обробкою даних, за можливістю плоскою, зберігаючи

при цьому присутні в реєстрації завади та цікаві для нас сигнали. Виконання такої корекції можна здійснити кількома способами, про які й піде мова нижче.

Відповідна базова лінія (профіль базової поверхні за часом або по частоті) повинна відповідати двом основним критеріям: придатності та плавності ходу. Вимога «придатність» передбачає, що оцінена базова лінія точно описує інформацію вихідного сигналу в областях, вільних від завод, а плавність гарантує, що оцінена базова лінія не схильна до впливу завод. У подальшому розгляді ми будемо приділяти увагу тільки базовій лінії, що відображає зміни даних за частотою. Ті ж підходи, що використовуються для такої базової лінії, застосовні й для базової лінії за часом, але прояви змін останньої стають помітними радше на тривалих записах.

Для початку зауважимо, що завдяки широкосмуговості інструменту для спостережень зазначену базову лінію складно апроксимувати лінійною, поліноміальною або іншою функціональною залежністю у відомому аналітичному вигляді. У зв'язку з цим можна було б спробувати скористатися частково-лінійною апроксимацією базової лінії [11]. Вона розбиває запис даних у залежності від частоти в заданий момент часу на список підмножин із суміжними діапазонами частот, а потім для кожного діапазону знаходить лінійну регресію, яка зазвичай забезпечує набагато кращу точність, ніж одна лінійна регресія для всіх частот спостережень. Таким чином, апроксимація базової лінії є послідовністю лінійних сегментів. У цьому контексті сегментовану лінійну регресію можна розглядати як декомпозицію цієї фундаментальної лінії на відносно невеликий набір простих відрізків, які забезпечують компактне, але приблизне представлення базової лінії із заданою точністю. Істотним недоліком даного підходу є те, що він не відповідає критерію «гладкості». Саме такі проблеми притаманні й іншим частково-функціональним апроксимаціям. Тому для наших цілей вони не підходять. Ми розглянемо альтернативні та досить загальні підходи для оцінки базової лінії, що задовольняють наведеним вище критеріям. Ці методи є кращими за метод нормування тому, що вони побудовані на мінімізації внеску небажаних заводових сигналів.

Один з таких підходів — асиметричне згладжування методом найменших квадратів (в англійській аббревіатурі *AsLS* [12,13]). Його переваги полягають у тому, що: 1) він швидкий навіть для дуже довгих сигналів; 2) гнучкість базової лінії можна легко налаштувати одним параметром; 3) положення базової лінії підстроюється за допомогою іншого параметра. На жаль, у цій ситуації немає універсального рецепта автоматичного вибору параметрів для довільних сигналів, тому потрібна людська участь. В основі даного підходу лежить особливий згладжувач [12]. Якщо y — сигнал довжини m , в якому вибірка проводиться через рівні проміжки часу, то нехай z — інша вибірка тієї ж довжини через ті ж проміжки часу, яка повинна мати наступні властивості: 1) бути гладкою, і 2) бути близькою до y . Ці дві мети можуть бути об'єднаними шляхом мінімізації штрафної функції найменших квадратів, що записується у вигляді:

$$S = \sum_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 z_i)^2, \quad (1)$$

де $\Delta^2 z_i = z_i - 2z_{i-1} + z_{i-2}$. Саме знаходження z і є кінцевою метою даного обчислення. Перший член у S вимірює відповідність даним, а другий член — штрафний внесок за негладку поведінку z . Параметр λ налаштовує баланс між двома цими членами. Потім у вираз (1) вводиться ваговий вектор w і мінімізується співвідношення більш загального характеру, як от:

$$S = \sum_i w_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 z_i)^2.$$

Завдання мінімізації приводить до наступної системи рівнянь:

$$(W + \lambda D'D)z = W_y. \quad (2)$$

де $W = \text{diag}(w)$, D — це матриця різниць: $Dz = \Delta^2 z$, а D' позначає транспоновану матрицю D . Зазвичай це велика система, оскільки кількість рівнянь дорівнює m , де y — довжина. Але це також є і дуже розрідженою системою, де лише головна діагональ і дві піддіагоналі вище і нижче не дорівнюють нулю. Ефективне зберігання й обчислення матриць (обидві лінійні по m) є можливим при використанні будь-якої класичної мови програмування. При використанні такого згладжу-

вання знаки залишків $y - z$ не мають значення: позитивний залишок отримує ту ж саму вагу, що і негативний. Але більш цікаві та корисні результати виходять, якщо змінити це і надати набагато більшу вагу негативним залишкам. Якщо ввести параметр p і обчислювати ваги наступним чином:

$$w_i = \begin{cases} p, & y_i > z_i, \\ 1-p, & y_i \leq z_i, \end{cases} \quad (3)$$

тоді мета буде полягати в тому, щоб знайти розв'язання, скажімо $z(p)$, рівняння (2), що відповідатиме певному набору вагових коефіцієнтів. У цьому і полягає принцип асиметричних найменших квадратів, який застосовується до згладжування. Хоча може здатися, що рівняння для розв'язання виглядають складними через взаємну взаємодію вагових коефіцієнтів і гладкої кривої, проте вони легко перетворюються до ітеративного застосування двох простих розрахунків. Спочатку знаходиться наближене розв'язання z в результаті згладжування з однаковими вагами. Використовуючи z , на наступному етапі обчислюються нові ваги. З цими вагами розв'язується система рівнянь (2), щоб отримати нову оцінку z . Ці кроки повторюються доти, доки ваги не перестануть змінюватися. Виявляється, можна довести, що така мета пошуку розв'язання є опуклою, і що ітерації завжди йдуть вниз по градієнту, так що збіжність буде завжди досягнутою. На практиці для цього достатньо від 5 до 10 ітерацій. При застосуванні даного алгоритму потрібно пам'ятати про два параметри: асиметрії (p) та гладкості (λ). Обидва повинні бути налаштовані під наявні експериментальні дані. Як правило, величини порядку $0.001 \leq p \leq 0.1$ і $10^2 \leq \lambda \leq 10^9$ стають непоганим вибором (для сигналу з позитивними піками), хоча іноді можуть виникати і виключення [13].

Однак у даного методу є свої недоліки [14]. Параметри λ і p необхідно оптимізувати, щоб отримати найкращий результат. Більш важливо, щоб параметри асиметрії у виразі (3) були однакові в чистій області базової лінії. Але ваги в чистій області базової лінії повинні бути встановленими відповідно до відмінностей між раніше встановленою базовою лінією та вихідними сигналами. У зв'язку з цим було запропоновано покращений

метод знаходження базової лінії. Коротко його суть полягає в наступному. Ваги встановлюються рівними або близькими до нуля, якщо сигнали вище підбраної базової лінії. Оскільки сигнали, що нижче цієї базової лінії отримують набагато більшу вагу, базова лінія переоцінюється у бік зменшення, щоб зменшити величину $S(z)$. В результаті остаточно базова лінія недооцінюється в області відсутності піків, і як наслідок висота піків може бути завищеною через цей ефект. Щоб вирішити цю проблему, було запропоновано наступну ідею [14]. В області, де реєструються експериментальні значення без піків, шум передбачається таким, що він однаково представлений нижче і вище базового рівня. Тоді природно буде надати однакові ваги всім сигналам в цій області, щоб уникати недооцінки базового рівня. Але якщо рівень сигналу набагато перевищує базовий, ваговий коефіцієнт встановлюється на нуль, оскільки такий сигнал є частиною піку. Для виконання цих вимог обираються частково збалансовані, але асиметричні ваги:

$$w_i = \begin{cases} \text{logistic}(y_i - z_i, m_{d^-}, \sigma_{d^-}), & y_i > z_i, \\ 1, & y_i \leq z_i, \end{cases} \quad (4)$$

де m_{d^-} та σ_{d^-} — середнє значення та стандартне відхилення величин d^- відповідно. Оскільки у векторному вигляді $d = y - z$, то d^- є частиною d , яка визначається тільки в області, де $y_i < z_i$. Логістична функція в наведеному вище виразі (4), яка визначається наступним чином:

$$\text{logistic}(d, m, \sigma) = \frac{1}{1 + e^{2(d - (-m + 2\sigma))/\sigma}}.$$

Така логістична функція надає майже однакову вагу сигналу нижче або вище базової лінії, коли різниця між сигналом і базовою лінією менше, ніж розрахункове середнє значення шуму. Однак вона поступово знижує вагу в міру збільшення рівня сигналу. Якщо сигнал знаходиться в межах 3σ від розрахункового середнього значення шуму, яке покриває 99.7% гауссового шуму, невелика вага все ж дається. Нарешті, нульова вага надається, якщо сигнал є набагато вищим від базової лінії, оскільки його можна розглядати як частину піку. У разі великих значень сигналу

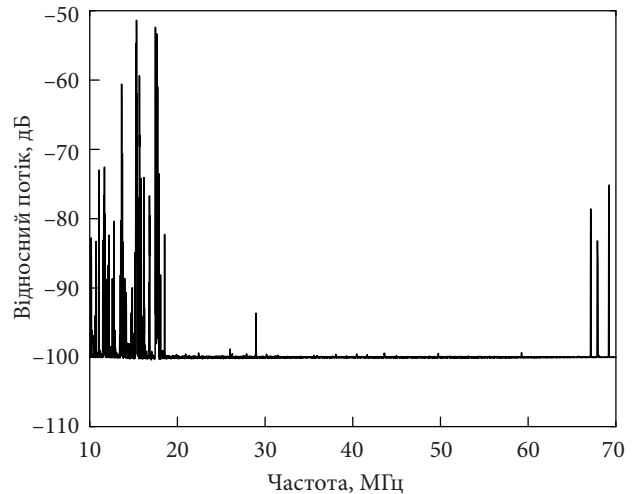


Рис. 2. Вирівнювання базової лінії (частотного профілю) динамічного спектра за допомогою алгоритму найменших квадратів з асиметрично перевизначеними вагами

щодо базової лінії стандартне відхилення майже дорівнює нулю, логістична функція стає зрушеною та оберненою функцією одиничного кроку, яка згладжує й оцінює базову лінію, залишаючи незмінним пік над шумом. Цей метод отримав назву згладжування методом найменших квадратів з асиметрично перевизначеними вагами (в англійській аббревіатурі *arPLS* [14]). Його оцінки базової лінії виявляються акуратнішими, ніж метод раніше (рис. 2). Як приклад використання даного методу в радіоастрономічних дослідженнях можна згадати нещодавню роботу, що присвячена спостереженням на радіотелескопі FAST [15]. Слід зазначити також, що цей метод можна використовувати в інших розрахунках.

3. Виявлення завад на спектрах реєстрацій радіовипромінювання

Після вирахування (або вирівнювання) базової лінії ми приступаємо до застосування процедур із виявлення проявів завад на динамічних спектрах. Мета такого аналізу полягає в побудові маски, на якій буде позначено положення завад у системі координат частота—час. За допомогою отриманої маски можливо істотно послабити вплив завад на загальний спектр прийнятого антеною радіотелескопа сигналу при його візуалізації. Далі ми розглянемо сучасні програмні методи виявлення завад у записах спостережень більш детально.

3.1. Метод MAD

У часовій області сигнал із завадами, який реєструється радіотелескопом, можна записати у вигляді [16]:

$$x(t) = x_{src}(t) + x_{sys}(t) + x_{RFI}(t),$$

де $x_{src}(t)$ — внесок радіоастрономічного джерела (корисний сигнал); $x_{sys}(t)$ — системний шум (небажаний сигнал); $x_{RFI}(t)$ — сигнал завад (теж небажаний сигнал). Системний шум — це комбінація фоновому шуму радіонеба та шуму підсилювачів антенної системи. І радіоастрономічний сигнал, і системний шум є випадковими сигналами, які часто мають гауссовий розподіл ймовірності. Варто зазначити, що є також інші випадки (радіовипромінювання Сонця, Юпітера, Сатурна, пульсарів чи транз'єнтів), які мають інші розподіли. Завади зазвичай мають негауссовий розподіл. Дисперсія вибірки — важливий показник статистичних викидів (outliers), до яких відносяться завади. Але в загальному випадку викиди можуть бути результатом внутрішньої мінливості даних, помилок у реєстрації та завад від зовнішніх джерел.

Викиди істотно впливають як на середнє значення, так і на стандартне відхилення вибірки. Тому так важливо знайти надійні способи розрахунку статистичних властивостей даних, щоб максимально ефективно визначити величину порогу, що дозволяє розрізнити корисні сигнали від завадних. Деякі статистичні методи чутливі до екстремальних значень, тоді як інші стійкі до них. Визначення медіанного абсолютного відхилення вибірки (в англійській аббревіатурі MAD) — один з простих і ефективних методів оцінювання, який широко використовується в радіоастрономічних спостереженнях [17, 18]. Медіанне абсолютне відхилення використовується замість середнього відхилення, коли крайні значення з області відхилень повинні менше впливати на величину відхилення. Використовується воно тому, що медіана зачіпається крайніми значеннями області відхилень меншою мірою, ніж середнє. Вона обчислюється для вибірки даних $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ за формулою

$$MAD = \{|x_i - median(X)|\},$$

за допомогою якого визначається робастне стандартне відхилення:

$$\sigma_r = 1.4826 \cdot MAD,$$

де *median* — медіана вибірки, яка знаходиться шляхом упорядкування даних $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$. Тоді це значення дорівнює $x_{(n/2)}$, але якщо число n непарне, то медіан визначається як середнє $(x_{(n-1)/2} + x_{(n+1)/2})/2$. Константа 1.4826 робить цю оцінку відповідно до тої, що очікується з гауссового розподілу. Якщо дані мають гауссовий характер, тоді значення σ_r дорівнюватиме стандартному відхиленню, а медіана — середньому. Тепер можна встановити межі нашого набору даних в межах трьох медіанних абсолютних відхилень від медіани набору даних замість трьох стандартних відхилень від середнього. Тоді ми вважаємо точку даних x_k як заваду, якщо:

$$x_k < median(X) - 3\sigma_r \text{ або } x_k > median(X) + 3\sigma_r.$$

Можна піти й іншим шляхом, використовуючи MAD: перший пороговий рівень χ_1 визначається оцінкою середнього x_k , дисперсії σ і параметра агресивності β . Оскільки медіана менш чутлива до викидів, вона краще традиційного середнього в цьому рівнянні (таким чином $\bar{x} = median(X)$), а σ_r з аналогічних причин — традиційного стандартного відхилення ($\sigma = \sigma_r$). З огляду на це, поріг χ_1 набуває вигляду:

$$\chi_1 = \bar{x} + \beta\sigma.$$

Збільшенням значення β знижується агресивність порога, а зменшенням збільшується. Послідовність порогових рівнів визначається рівнянням

$$\chi_i = \frac{\chi_1}{\rho^{\log_2 i}},$$

де $\rho = 1.5$ було знайдено емпірично [6]. Ця величина вказує, наскільки «грубою» буде різниця в порогових рівнях. Переваги оцінювання MAD полягають в її максимальній стійкості до викидів і обмеженій функції впливу з максимальною точною межею, а крім того вона швидко обчислюється, але, на жаль, у неї низький ККД, 37 %. Тому метод MAD слід використовувати з належною обережністю.

3.2. Метод CUSUM

Метод кумулятивної суми (в англійській аббревіатурі *CUSUM*) добре відомий як метод для виявлення змін в параметрах розподілу вибірки даних [19]. Кумулятивні суми визначаються наступним чином:

- спочатку розраховується середнє $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;
- починається кумулятивна сума з нуля, вважаючи $S_0 = 0$;
- обчислюються інші кумулятивні суми, додавши різницю між поточним значенням і середнім значенням до попередньої сумі, тобто $S_i = S_{i-1} + (x_i - \bar{x})$ для $i = 1, 2, \dots, n$.

Кумулятивні суми не є кумулятивними сумами значень вибірки. Замість цього вони являють собою кумулятивні суми різниць між значеннями та середнім значенням. Сума цих різниць дорівнює нулю, тому кумулятивна сума завжди закінчується нулем. Метод *CUSUM* легше зрозуміти, побудувавши з величин кумулятивних сум діаграму.

Припустимо, що протягом певного періоду часу дані мають тенденцію бути вище загальної середньої. Більшість значень, доданих до кумулятивної суми, будуть позитивними, і сума буде постійно збільшуватися. Сегмент діаграми *CUSUM* із висхідним нахилом вказує період, коли значення мають тенденцію бути вище загальної середньої. Так само сегмент із нахилом вниз вказує період часу, коли значення мають тенденцію бути нижче загальної середньої. Раптова зміна напрямку *CUSUM* вказує на раптовий зсув або зміну середнього значення. Сегмент графіка *CUSUM* прямого напрямку вказує на період, коли середнє значення не змінилося. Для оцінки величини зміни добре може служити величина різниці між максимальним значенням кумулятивних сум і мінімальним, яка працює незалежно від розподілу та незважаючи на кілька змін. Проте, метод *CUSUM* не оцінює час початку зміни, він тільки швидко виявляє таку зміну, але це може зайняти якийсь час, і, таким чином, деякі небажані дані можуть просочитися до того, як метод виявить заваду. Отже, цей метод більш застосовний до первісної перевірки даних на наявність завад, ніж до фактичного виконання виділення на спектрі областей з сигналами завад [6].

3.3. Метод SumThreshold

Порогові методи виявлення завад працюють на основі того, що якщо амплітуди такого сигналу вище певного порогового рівня, то вони виявляються та позначаються у вигляді свого роду маски, по якій стає відомо, де на площині частота—час знаходиться небажаний сигнал. Граничний рівень визначається суто статистикою отриманих спостережних даних. З методом *SumThreshold* пов'язані дві концепції [6]: поріг і розмір підмножини. Підмножина — це невеликий фрагмент всіх елементів (у даному випадку амплітуд даних на динамічному спектрі) в певному напрямку масиву (час або частота).

Припустимо, що A і B — сусідні вибірки (фрагменти) з масиву даних. При звичайному встановленні порогу кожна з вибірок A і B розглядають окремо та позначають одну з них, якщо вона перевищує певний поріг χ_1 «одиночної вибірки». Для комбінаторної порогової обробки (до якої відноситься метод *SumThreshold*) додано новий критерій оцінки: якщо A і B не перевищують порогове значення χ_1 кожної вибірки окремо, вони все ще можуть бути помічені, якщо A і B обидва перевищують дещо нижчий поріг χ_2 . Якщо такого немає, їх можна об'єднати з третім сусідом C і встановити поріг χ_3 і т. д. Чим більше з'єднаних відліків об'єднується, тим нижче буде встановлюватися для них поріг. Такий підхід дозволяє виявляти не тільки вузькосмугові завади, а й завади складної конфігурації, розподілені за частотою та часом.

Однак значення кожного порогу повинні бути точно налаштованими під конкретну ситуацію, що збільшує необхідність ручного втручання в цей метод. Якщо таке налаштування виконано недостатньо точно, то можливо маркування якоїсь частини сигналів, які не є завадами [20]. З іншого боку, за допомогою порогових алгоритмів важко виявити слабкі завади або небажані коливання базової лінії, оскільки вони можуть показувати рівні сигналу, аналогічні радіоастрономічним.

Крім того, сам метод не є швидким, оскільки він багаторазово аналізує одну й ту саму ділянку динамічного спектра з різними порогоми та об'єднаннями. Слід зазначити, що даний метод застосовується в пошуках пульсарів і тран-

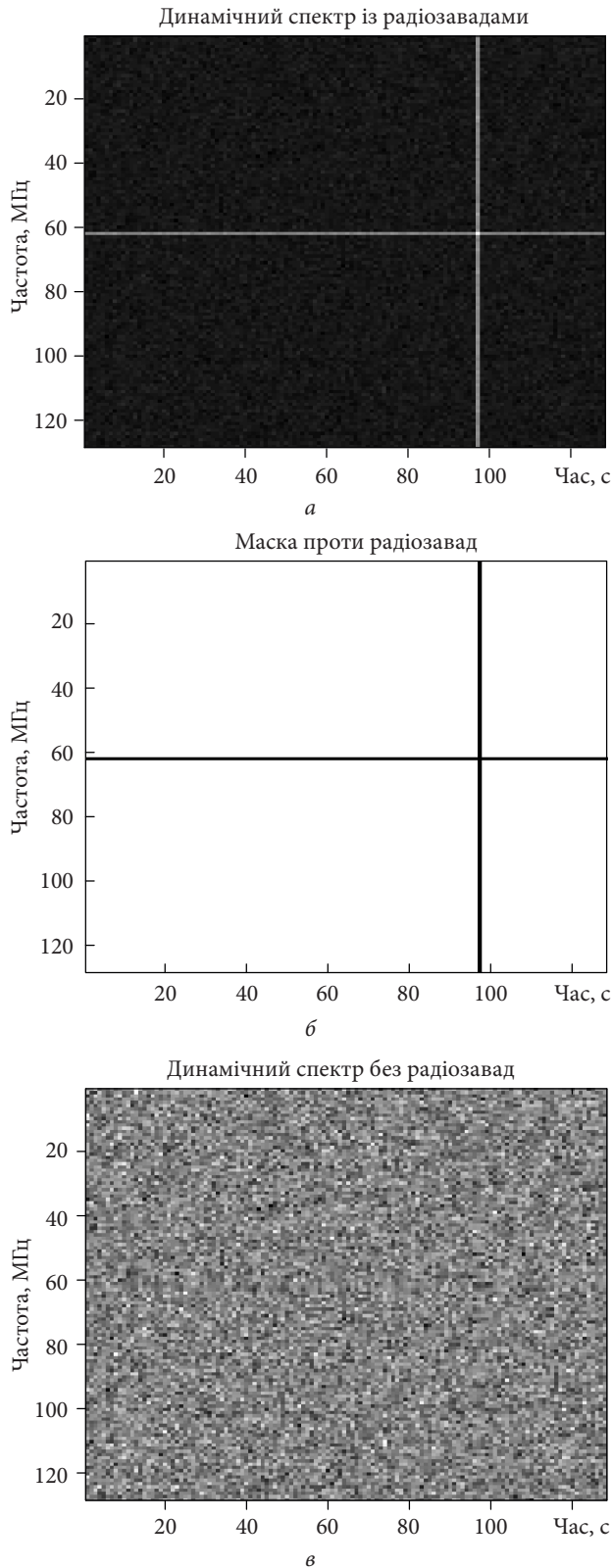


Рис. 3. Моделювання з виявлення вузькосмугових завад на динамічному діапазоні 128×128 методами SumThreshold і Box & Whiskers: з завадами (а); знайдена маска завад (б); після видалення завад і відновлення пошкоджених ділянок спектра методом Inpainting (в)

зієнтів [21–23], а також у дослідженні радіо-випромінювання Юпітера [24, 25]. Моделювання використання даного методу представлено на рис. 3. Проте даний метод погано підходить для первинної обробки сонячних сплесків, оскільки ідентифікує їх як завади.

3.4. Method Box & Whiskers

Цей метод засновано на розрахунку кватилів. Ці величини ділять кількість точок даних на чотири більш-менш рівні частини, або кватилі. Звідси і назва методу. Перший кватиль (Q_1) визначається як середнє число між найменшим числом і медіаною набору даних. Він також відомий як нижній кватиль, або 25-й емпіричний кватиль, і зазначає, де 25 % даних знаходяться нижче або зліва від нього (якщо дані впорядковані на часовій шкалі від найменшого до найбільшого). Другий кватиль (Q_2) — це медіана набору даних, і 50 % даних знаходиться нижче цієї точки. Третій кватиль (Q_3) — це середнє значення між медіаною та найвищим значенням набору даних. Він також відомий як верхній кватиль, або 75-й емпіричний кватиль, і 75 % даних знаходяться нижче цієї точки [26].

У зв'язку з тим, що для обчислення кватилів необхідно впорядкувати дані від найменшого до найбільшого, кватилі є формою статистики порядку, які можна швидко порахувати за допомогою сортування відліків. Різниця між верхнім і нижнім кватиліями, Q_3 і Q_1 , називається межкватильний розмах IQR . Після визначення першого і третього кватилів, а потім межкватильного розмаху, як зазначено вище, межі розраховуються за такою формулою:

$$L = Q_1 - 1.5(IQR) \text{ та } U = Q_3 + 1.5(IQR).$$

Нижня межа — це «нижній поріг», а верхня межа — «верхній поріг» даних, і будь-які дані, що виходять за ці певні межі, можна розглядати як викиди (в нашому випадку ними можуть бути завади). Якщо застосувати цей метод до змодельованого сигналу (рис. 3, а), то він також добре виявляє сигнали завад, як і метод SumThreshold. Тому ми не будемо тут наводити відповідні рисунки. Це доводить, що метод Box & Whiskers може давати не гірший результат, ніж попередній.

4. Заповнення пошкоджених областей на спектрі

Після виявлення небажаних сигналів (це можуть бути як завади, так і сигнали космічних об'єктів, що спостерігаються одночасно, але не становлять особливого інтересу на даний момент) на динамічному спектрі нам необхідно, із зазначених вище причин, мінімізувати їхній вплив на загальну картину спектра. У цьому полягає кінцева мета попередньої обробки записів спостережень, яка дозволить найбільш чітко встановити картину досліджуваної події за візуальним відображенням спектра прийнятого радіовипромінювання.

4.1. Лінійна і нелінійна інтерполяції

Найпростіший (але не найкращий) спосіб видалення впливу небажаних сигналів після їхнього виявлення на записах реєстрацій — це в цих місцях динамічних спектрів провести звичайну інтерполяцію між частотними каналами й інтервалами часу, які охоплюють дану заваду. Іншими словами, ця ідея полягає в з'єднанні лінією або при необхідності поверхнею ділянки динамічного спектра навколо завад. Метод інтерполяції функцій і поверхонь широко відомий у науковій літературі, і тому ми не будемо описувати його тут докладно, а приділимо увагу його недолікам стосовно попередньої обробки динамічних спектрів. Оскільки по суті цей метод детермінований і використовується для роботи із шумоподібними сигналами, але слід зауважити, що його застосування призводить до деградації статистики даних. Це проявляється насамперед у тому, що з'являється спотворення імовірнісного розподілу та зменшення розкиду вихідних даних. У результаті дисперсія вибірки після застосування зазначеного методу стає недооціненою. Звичайно, це залежить від розміру області, яку було піддано такій інтерполяції. Якщо поверхня, на якій є «дірки» (місця, позначені заважаючим впливом інших сигналів), має складну поведінку, то у цьому випадку даний метод вже не буде простим у застосуванні. Замість нього слід використовувати інші методи, які описано нижче.

4.2. Inpainting-метод

В обробці зображень (наприклад, в фотографії) широко використовується Inpainting-метод.

Його алгоритм описано у роботі [27]. Суть його полягає у відновленні пошкоджених або відсутніх частин зображення, використовуючи різні типи диференціальних рівнянь у частинних похідних. При цьому слід ясно розуміти, що інформація всередині області, в якій буде проводитися Inpainting, є повністю втраченою, і однозначного відновлення не існує. Отже, щоб вирішити цю проблему, застосовуються різні припущення для побудови зв'язку між відсутньою частиною та її відомою границею. Структурна реалізація Inpainting використовує геометричні підходи для заповнення відсутньої інформації в області, яка має бути відновленою. Ці алгоритми орієнтовано на узгодженість геометричної структури. Текстура зображення має повторюваний візерунок. Це означає, що відсутню ділянку неможливо відновити, продовжуючи лінії рівня в ушкодженому місці зображення. Ці алгоритми стануть у нагоді, коли алгоритми структурної реалізації Inpainting не можуть відновити текстуру зображення через власні обмеження. Нас буде переважно цікавити структурний Inpainting, який більше підходить для наших потреб. Тепер перейдемо власне до методик заповнення прогалів у зображенні. Для наших цілей підходить рівняння теплопровідності Фур'є — диференціальне рівняння в частинних похідних, — якщо застосувати його відносно умовної «температури», як от інтенсивності кожного кольору в відображенні RGB або відтінків сірого в чорно-білому зображенні. Це рівняння дає змогу розрахувати «температуру» u у будь-якій точці матеріалу в двовимірному просторі для будь-якого заданого часу, знаючи «теплопровідність» матеріалу і початкові температурні умови $u(t=0)$:

$$-u_t = c^2(u_{xx} + u_{yy}).$$

Задача Діріхле для цього рівняння полягає в знаходженні такого розв'язання в деякій області D , де φ на границі D дорівнює певній заданій функції. Це означає, що саму функцію u визначено на границях зазначеної області. Отже, знаходження розв'язання рівняння теплопровідності могло б бути корисним підходом до цієї проблеми, де можна буде повторювати процес для різних інтервалів часу. Однак більш точний і розумний підхід використовує сценарій, в якому час прямує до нескінченності, тобто темпера-

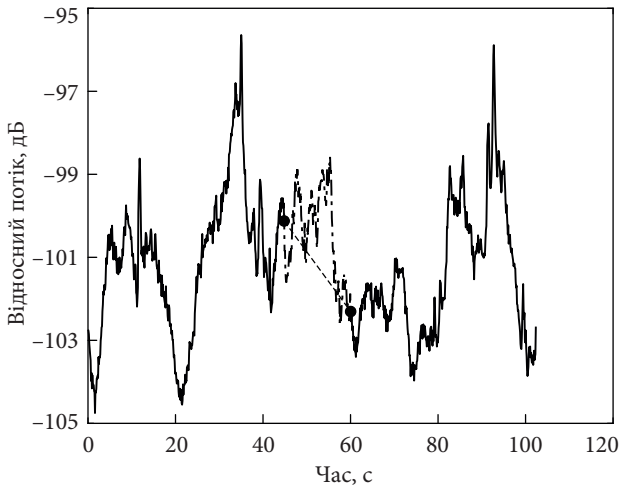


Рис. 4. Стохастична інтерполяція броунівським мостом (штрих-пунктирна лінія між чорними жирними точками, де була видалена інтенсивна завада). Пунктирна лінія показує звичайну лінійну інтерполяцію

тура вже є розподіленою по всій поверхні. Цей сценарій можна було б краще змодельовати, використовуючи рівняння стаціонарної теплопровідності або рівняння Лапласа, що не часової залежності:

$$\Delta^2 u = u_{xx} + u_{yy} = 0.$$

Отже, для аналізу зображень та здійснення Inpainting скористуємось рівнянням Лапласа аби знайти розподіл «температури» для відсутніх областей в зображенні. Інтенсивність кольору в зображенні RGB або інтенсивність відтінків сірого в чорно-білому зображенні може служити температурою, яку треба знайти для відсутніх областей у зображенні.

Таким чином, інтенсивність кольору області, навколишнього отвору або частини, яка повинна бути видаленою або реконструйованою, може використовуватися як граничні умови Діріхле для рівняння Лапласа. Оскільки зображення наведені у вигляді матриць, де кожен елемент є пікселем, то вони, по суті, мають дискретну природу. З іншого боку, рівняння в частинних похідних або інші подібні рівняння моделювання є безперервними.

Отже, щоб застосувати рівняння Лапласа до зображення, необхідно дискретизувати його представлення в моделі. Часткові похідні другого порядку цього рівняння можна апроксимувати, використовуючи центральну різницеву схе-

му у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u(x - \Delta x, y) - 2u(x, y) + u(x + \Delta x, y)}{(\Delta x)^2},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx \frac{u(x, y - \Delta y) - 2u(x, y) + u(x, y + \Delta y)}{(\Delta y)^2},$$

де $x \in [ab]$, $\Delta x = (b - a) / N$, $y \in [cd]$, $\Delta y = (d - c) / M$. Тепер на зображенні з пошкодженою або відсутньою частиною потрібно вручну або автоматично позначити прямокутну область навколо цієї частини. Ця конкретна область буде служити отвором, що передбачається заповнити пікселями відповідно до розрахунків. У нас буде точна величина насиченості кольору оточуючих пікселів, які будуть служити граничними умовами Діріхле. Використовуючи граничні умови, перейдемо до дискретизованого рівняння Лапласа для обробки наступних пікселів. Із рівняння, отриманого вище, можна помітити, що інтенсивність кожного пікселя (i, j) в області отвору повинна регулюватися інтенсивністю пікселів безпосередньо ліворуч, праворуч, зверху і знизу від нього. Процес повинен привести до формування декількох лінійних рівнянь, які можна буде розв'язати за допомогою гауссового підходу. Оскільки динамічний спектр теж по суті є свого роду зображенням, то застосування методу Inpainting до нього може виявитися в деяких випадках вельми корисним способом обробки експериментальних даних [28].

4.3. Броунівський міст

Застосування броунівського моста відноситься до стохастичних методів інтерполяції. Він зберігає гауссову статистику даних і в цьому його перевага перед методами, згаданими вище, але перед його застосуванням необхідно визначити величину дисперсії шуму, який оточує ту область, яку необхідно інтерполювати. По суті броунівський міст — це випадковий процес X_t , який являє собою броунівський рух між фіксованими точками $X_0 = a$ і $X_T = b$. Він задовольняє стохастичному диференціальному рівнянню:

$$dX = dW, X_0 = a, X_T = b,$$

де dW — це вінерівський процес $\sigma \sqrt{dt} N(0, 1)$, який можна подати як нормальну випадкову величи-

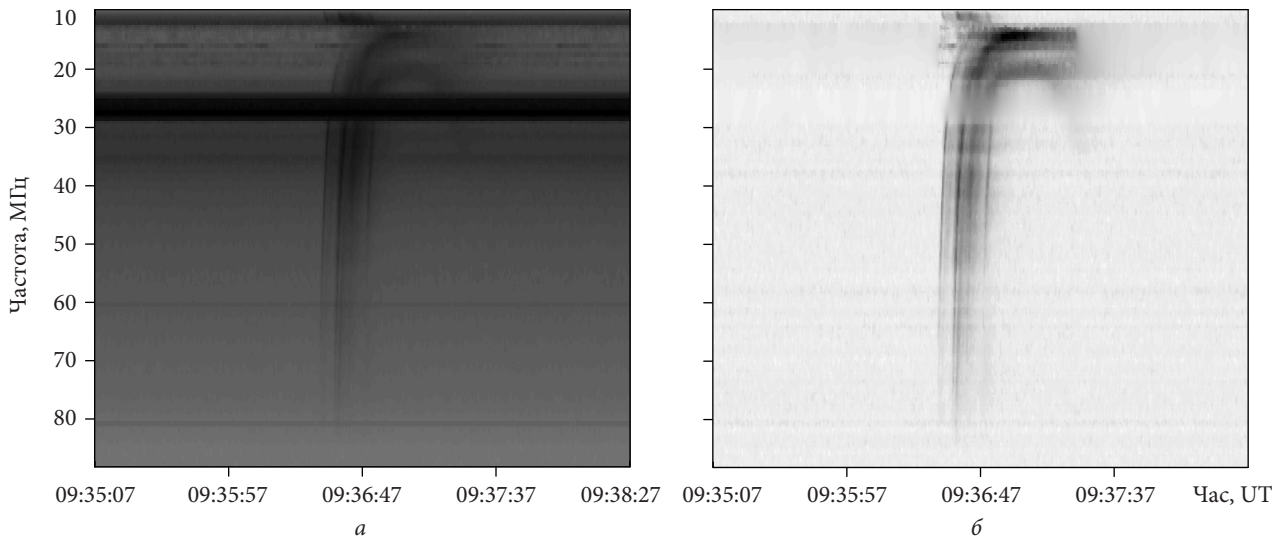


Рис. 5. Спектр сплеску *U* типу до обробки (*a*) і після мінімізації небажаного впливу радіозавад (*б*), що дозволяє побачити деталі тонкої структури та еволюцію події. Завади становлять приблизно 15–16 % всього динамічного спектра, що сильно ускладнює інтерпретацію цієї події

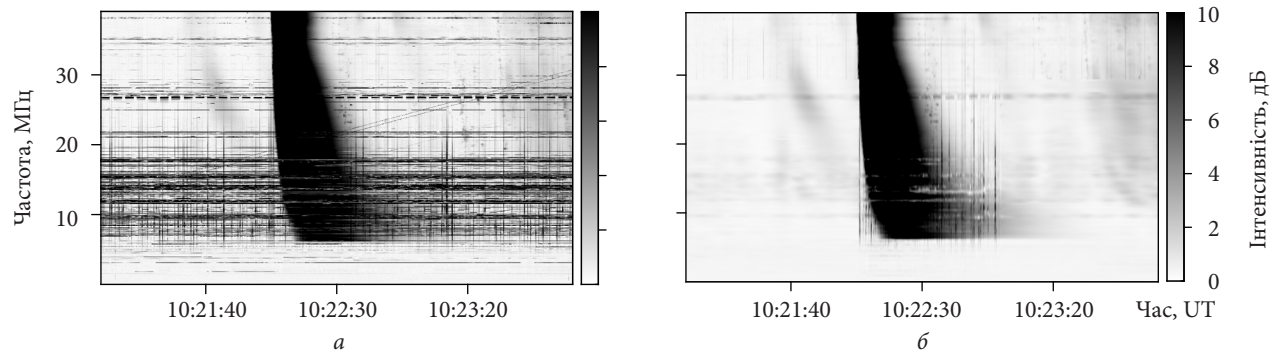


Рис. 6. Спектр інтенсивного сплеску III типу до обробки (*a*) і після мінімізації небажаного впливу сильних радіозавад (*б*), що дозволяє дослідити часові та частотні властивості події до частоти іоносферного відсічення, яка дорівнює приблизно 6 МГц та перебуває за межами можливостей радіотелескопів ГУРТ та УТР-2. Спостереження виконані 22.05.2021 р. за допомогою прототипу антени місячного телескопа

ну зі стандартним відхиленням $\sigma\sqrt{dt}$. Розв’язок цього рівняння має аналітичний вигляд [29]

$$X_t = a\left(1 - \frac{t}{T}\right) + b\frac{t}{T} + \left(W_t - \frac{t}{T}W_T\right), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Це дозволяє виключно просто розрахувати броунівський міст:

- спочатку моделюємо броунівський рух W_t у точках сітки $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = T$;
- потім знаходимо броунівський міст у цих же точках сітки за формулою

$$X_i = a\left(1 - \frac{t_i}{T}\right) + b\frac{t_i}{T} + \left(W_i - \frac{t_i}{T}W_T\right),$$

де ми використовуємо позначення $X_i = X_{t_i}$ та $W_i = W_{t_i}$. Приклад моделювання показано на

рис. 4. При необхідності цей підхід можна застосувати і для частотної сітки динамічного спектра.

5. Застосування методів видалення завад при обробці даних спостережень

Використання описаних і удосконалених методів дозволяє надійно виділяти базову лінію в найнесприятливіших завадових умовах, видаляти короткі інтенсивні завади та відокремлювати потужні сонячні сплески від завад, які при використанні звичайних методів спотворюються або маскуються. У наших вимірюваннях для отримання базової лінії ми використовували метод асиметричного згладжування найменших квадратів (розд. 1). Слід зазначити, що широко-

смутові та порівняно тривалі сигнали сонячних сплесків III, U, J та інших типів можна враховувати разом із базовою лінією і таким чином відокремити їх цим методом від завад. Приклад застосування методів, наведених в розд. 2 та 3, до динамічних спектрів сонячних сплесків показано на рис. 5. Він є пов'язаним із спостереженнями радіоподії 05.06.2020 р., яку докладно описано в роботі [30]. Така попередня обробка сигналу на динамічному спектрі дозволила вперше вочевидь виявити асоціацію III-U типів сонячних сплесків, що практично неможливо зробити на спектрі із завадами. Крім того, після такої попередньої обробки динамічного спектра можна чітко бачити поділ потоків електронів, частина яких повертала назад до Сонця (в результаті виник сплеск U типу), а інша продовжувала рух у міжпланетному просторі (сплескове радіовипромінювання нижче 13 МГц).

Таким чином, комбінація вдосконалених методів очищення від завад дозволяє коректно обробляти записи джерел із потужним сигналом у найважчих завадових умовах. Це особливо помітно у випадку радіоспостережень на надзвичайно низьких частотах, доступних із Землі завдяки іоносферному відсіканню (рис. 6). Слід зазначити, що ці спостереження було виконано за допомогою прототипу антени для місячного радіотелескопа [31].

Висновки

Радіоастрономічні спостереження у декаметровому діапазоні довжин хвиль проводяться в

умовах інтенсивних радіозавад різної природи. Особливо їх багато нижче 18 МГц, що суттєво ускладнює аналіз результатів спостережень. Оскільки апаратні можливості радіоастрономічних інструментів для цього діапазону частот не дозволяють повністю виключити вплив радіозавад, в даній роботі розглянуто різноманітні методи попередньої обробки даних із радіоастрономічних спостережень, мета яких полягає в мінімізації небажаних сигналів програмними засобами на результати вимірювань. Ця процедура складається з певної послідовності дій: вирівнювання базової лінії, виявлення небажаних сигналів, видалення їх з динамічного спектра та заповнення місць їхнього розташування шумоподібними сигналами з відповідними оточенню статистичними властивостями.

При цьому в арсеналі спостерігача є ще велика кількість різноманітних методів, головне завдання яких підвищити контраст потрібного сигналу на динамічному спектрі по відношенню до фонового випромінювання. Присутність інтенсивних завад нівелює порівняно слабкі сигнали досліджуваних космічних джерел, роблячи важкою їхню інтерпретацію. Тому розглянуті методи бажано мати на увазі при аналізі експериментальних даних низькочастотної радіоастрономії, особливо якщо ці спостереження мають пошуковий характер.

Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (Державні реєстраційні номери 0121U109536 і 0121U109956).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin, A. Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V.V., Shevchenko V.A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroschnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshev O., Rucker H.O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Iss. 1. P. 11–48.
2. Коноваленко О.О., Захаренко В.В., Калініченко М.М., Мельник В.М., Сидорчук М.А., Станиславський О.О., Степкін С.В., Ульянов О.М. Радіо випромінювання Всесвіту на декаметрових хвилях (заматеріалами циклу праць, що отримав Державну премію України в галузі науки і техніки у 2018 році). *Радіофізика і Радіоастрономія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 3–43. DOI: 10.15407/rpra24.01.003.
3. Коноваленко А.А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии. *Радіофізика і Радіоастрономія*. 2005. Т. 10, спец. вып. С. 86–114.

4. Baan W.A., Fridman P.A., and Millenaar R.P. Radio frequency interference mitigation at the Westerbork synthesis radio telescope: algorithms, Test observations, and System implementation. *Astrophys. J.* 2004. Vol. 128. pp. 933–949. DOI: 10.1086/422350.
5. Winkel B., Kerp J., and Stanko S. RFI detection by automated feature extraction and statistical analysis. *Astron. Nachr.* 2007. Vol. 328, Iss. 1. P. 68–79. DOI: 10.1002/asna.200610661.
6. 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. 405, Iss. 1. P. 155–167. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16471.x.
7. Коноваленко А.А., Соколов К.П., Степкин С.В. Определение оптимальных частот наблюдений на радиотелескопе УТР-2 в режиме радиообзора небесной сферы. *Радиофизика і Радіоастрономія.* 1997. Т. 2. № 2. С. 188–199.
8. Ryabov V.B., Vavriv D.M., Zarka P., Ryabov B.P., Kozhin R., Vinogradov V.V., and Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 510, id. A16, 13 p. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335.
9. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N.S., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H.O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griefsmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Iss. 4, id. 1641010.
10. Абрамян Э.П., Брук Ю.М., Захаренко В.В., Коноваленко А.А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2. *Радиофизика і Радіоастрономія.* 1997. Т. 2, № 1. С. 95–103.
11. Luwel K., Beem A.L., Onghena P. and Verschaffel L. Using segmented linear regression models with unknown change points to analyze strategy shifts in cognitive tasks. *Behav. Res. Methods Instrum. Comput.* 2001. Vol. 33, Iss. 4. P. 470–478.
12. Whittaker E.T. On a new method of graduation. *Proc. Edinburgh Math. Soc.* 1922. Vol. 41. P. 63–75.
13. Eilers P.H.C. A perfect smoother. *Anal. Chem.* 2003. Vol. 75, Iss. 14. P. 3631–3636. DOI: 10.1021/ac034173t.
14. Baek S.-J., Park A., Ahn Y.-J., and Choo J. Baseline correction using asymmetrically reweighted penalized least squares smoothing. *Analyst.* 2015. Vol. 140, Iss. 1. P. 250–257. DOI: 10.1039/C4AN01061B.
15. Zeng Q., Chen X., Li X., Han J.L., Wang C., Zhou D.J., and Wang T. Radio frequency interference mitigation based on the ArPLS and SumThreshold method. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2021. Vol. 500, Iss. 3. P. 2969–2978. DOI: 10.1093/mnras/staa2551.
16. Ford J. and Buch K. RFI mitigation techniques in radio astronomy. *2014 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2014).* Quebec City, QC, Canada, 13–18 July 2014. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946399.
17. Peck L.W. and Fenech D.M. Reduction and calibration pipelines for e-MERLIN and COBRAS. *11th Europ. VLBI Network Symp. & Users Meeting (11th EVN Symp.).* Bordeaux, France, 9–12 Oct. 2012. DOI: 10.22323/1.178.0103.
18. Baan W. RFI mitigation in radio astronomy. *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2011).* Istanbul, Turkey, 13–20 Aug. 2011. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6051248.
19. Basseville M. and Nikiforov I. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Applications.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall, NJ, USA, 1993.
20. 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.
21. Vasylieva I.Y., Zakharenko V.V., Zarka P., Ulyanov O.M., Shevtsova A.I., and Seredkina A.A. Data processing pipeline for decameter pulsar/transient survey. *Odessa Astron. Publ.* 2013. Vol. 26, Iss. 2. P. 159–161.
22. Захаренко В.В., Рябов В.Б., Кравцов І.П., Милостна К.Ю., Харланова В.Ю., Васильєва Я.Ю., Ульянов О.М., Коноваленко О.О., Калініченко М.М., Зарка Ф., Рукер Г., Фішер Г., Єрін С. М., Грісмайер Ж.-М., Сидорчук М.А., Шевцова А.І., Скорик А.О., Шевченко В.А. Спорадичне радіовипромінювання космічних об'єктів на низьких частотах. *Радиофизика і Радіоастрономія.* 2021. Т. 26. № 2. С. 99–129. DOI: 10.15407/rpra26.02.099.
23. Cendes Y., Prasad P., Rowlinson A., Wijers R.A.M.J., Swinbank J.D., Law C.J., van der Horst A.J., Carbone D., Broderick J.W., Staley T.D., Stewart A.J., Huizinga F., Molenaar G., Alexov A., Bell M.E., Coenen T., Corbel S., Eislöffel J., Fender R., Griefsmeier J.-M., Jonker P., Kramer M., Kuniyoshi M., Pietka M., Stappers B., Wise M. and Zarka P. RFI flagging implications for short-duration transients. *Astron. Comput.* 2018. Vol. 23. P. 103–114. DOI: 10.1016/j.ascom.2018.04.001.
24. 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. Roy. Astron. Soc.* 2013. Vol. 431, Iss. 4. P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470.
25. Vasylieva I.Y. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. 2015. *PhD Thesis ed.* Observatoire de Paris [viewed 19 April 2021]. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634>.
26. Ross S.R. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists.* Fifth Edition. New York: Wiley, 2014.
27. Bertalmio M., Sapiro G., Caselles V. and Ballester C. Image inpainting. *Proc. 27th Annual Conf. Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 2000).* New Orleans, LA, USA, 23–28 July 2000. P. 417–424.
28. Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Koval A.A., Dorovskyy V.V., Zarka P., and Rucker H.O. Coronal magnetic field strength from decameter zebra-pattern observations: Complementarity with band-splitting measurements of an associated Type II burst. *Sol. Phys.* 2015. Vol. 290, Iss. 1. P. 205–218. DOI: 10.1007/s11207-014-0620-9.
29. Karatzas I. and Shreve S.E. *Brownian Motion and Stochastic Calculus.* New York: Springer, 1998. DOI: 10.1007/978-1-4612-0949-2.

30. Stanislavsky L.A., Bubnov I.N., Konovalenko A.A., Tokarsky P.L., and Yerin S.N. The first detection of the solar U+III association with an antenna prototype for the future lunar observatory. *Res. Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 21, Iss. 8. id. 187. DOI: 10.1088/1674-4527/21/8/187.
31. Бубнов І.М., Коноваленко О.О., Токарський П.Л., Корольов О.М., Єрін С.М., Станіславський Л.О. Створення та апробація низькочастотної радіоастрономічної антени для досліджень об'єктів Всесвіту зі зворотного боку Місяця. *Радіофізика і Радіоастрономія*. 2021. Т. 26. № 3. С. 197–210. DOI: 10.15407/rpra26.03.197.

Стаття надійшла 02.06.2022

REFERENCES

- Konovalenko, A., Sodin, L., Zakharenko, V., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Tokarsky, P., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovskyy, V., Ryabov, V., Koval, A., Bubnov, I., Yerin, S., Gridin, A., Kulishenko, V., Reznichenko, A., Bortsov, V., Lisachenko, V., Reznik, A., Kvasov, G., Mukha, D., Litvinenko, G., Khristenko, A., Shevchenko, V.V., Shevchenko, V.A., Belov, A., Rudavin, E., Vasylieva, I., Miroshnichenko, A., Vasilenko, N., Olyak, M., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Plakhov, M., Kravtsov, I., Volvach, Y., Lytvinenko, O., Shevchuk, N., Zhouk, I., Bovkun, V., Antonov, A., Vavriv, D., Vinogradov, V., Kozhin, R., Kravtsov, A., Bulakh, E., Kuzin, A., Vasilyev, A., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Pylaev, O., Koshovyy, V., Lozinsky, A., Ivantyshein, O., Rucker, H.O., Panchenko, M., Fischer, G., Lecacheux, A., Denis, L., Coffre, A., Griefmeier, J.-M., Tagger, M., Girard, J., Charrier, D., Briand, C. and Mann, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.*, **42**(1), pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x.
- Konovalenko, O.O., Zakharenko, V.V., Kalinichenko, M.M., Melnik, V.M., Sidorchuk, M.A., Stanislavsky, A.A., Stepkin, S.V., and Ulyanov, O.M., 2019. Decameter Wavelength Radio Emission of the Universe. *Radio Phys. Radio Astron.*, **24**(1), pp. 3–43 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra24.01.003.
- Konovalenko, A.A., 2005. Low-Frequency Radio Astronomy Prospects. *Radio Phys. Radio Astron.*, **10**(5), pp. 86–114 (in Russian).
- Baan, W.A., Fridman, P.A., and Millenaar, R.P., 2004. Radio frequency interference mitigation at the Westerbork synthesis radio telescope: algorithms, Test observations, and System implementation. *Astrophys. J.*, **128**, pp. 933–949. DOI: 10.1086/422350.
- Winkel, B., Kerp, J., and Stanko, S., 2007. RFI detection by automated feature extraction and statistical analysis. *Astron. Nachr.*, **328**(1), pp. 68–79. DOI: 10.1002/asna.200610661.
- 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.
- Konovalenko, A.A., Sokolov, K.P., and Stepkin, S.V., 1997. Determination of Optimum Operating Frequencies for Observations with UTR-2 Radio Telescope in the Sky Surveying Mode. *Radio Phys. Radio Astron.*, **2**(2), pp. 188–198 (in Russian).
- Ryabov, V.B., Vavriv, D.M., Zarka, P., Ryabov, B.P., Kozhin, R., Vinogradov, V.V., and Denis, L., 2010. A low-noise, high dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.*, **510**, id. A16, 13 p. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335.
- Zakharenko, V., Konovalenko, A.A., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Koliadin, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Dorovskyy, V., Shepelev, V., Bubnov, I., Yerin, S., Melnik, V., Koval, A., Shevchuk, N., Vasylieva, I., Mylostna, K., Shevtsova, A., Skoryk, A., Kravtsov, I., Volvach, Y., Plakhov, M., Vasilenko, N., Vasylykivsky, I. Y., Vavriv, D., Vinogradov, V., Kozhin, R., Kravtsov, A., Bulakh, E., Kuzin, A., Vasilyev, A., Ryabov, V., Reznichenko, A., Bortsov, V., Lisachenko, V., Kvasov, G., Mukha, D., Litvinenko, G., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Pylaev, O., Koshovyy, V., Lozinsky, A., Ivantyshein, O., Rucker, H.O., Panchenko, M., Fischer, G., Lecacheux, A., Denis, L., Coffre, A., and Griefmeier, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.*, **5**(4), id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105.
- Abranin, E.P., Bruk, Yu.M., Zakharenko, V.V., and Konovalenko, O.O., 1997. Structure and parameters of new system of antenna amplification of radio telescope UTR-2. *Radio Phys. Radio Astron.*, **2**(1), pp. 95–103 (in Russian).
- Luwel, K., Beem, A.L., Onghena, P., and Verschaffel, L., 2001. Using segmented linear regression models with unknown change points to analyze strategy shifts in cognitive tasks. *Behav. Res. Methods Instrum. Comput.*, **33**(4), pp. 470–478.
- Whittaker, E.T., 1922. On a new method of graduation. *Proc. Edinburgh Math. Soc.*, **41**, pp. 63–75.
- Eilers, P.H.C., 2003. A perfect smoother. *Anal. Chem.*, **75**(14), pp. 3631–3636. DOI: 10.1021/ac034173t.
- Baek, S.-J., Park, A., Ahn, Y.-J. and Choo, J., 2015. Baseline correction using asymmetrically reweighted penalized least squares smoothing. *Analyst*, **140**(1), pp. 250–257. DOI: 10.1039/C4AN01061B.
- Zeng, Q., Chen, X., Li, X., Han, J.L., Wang, C., Zhou, D.J., and Wang, T., 2021. Radio frequency interference mitigation based on the ArPLS and SumThreshold method. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **500**(3), pp. 2969–2978. DOI: 10.1093/mnras/staa2551.
- Ford, J., and Buch, K., 2014. RFI mitigation techniques in radio astronomy. In: *2014 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS 2014)*. Quebec City, QC, Canada, 13–18 July 2014. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946399.
- Peck, L.W., and Fenech, D.M., 2012. Reduction and calibration pipelines for e-MERLIN and COBRAS. In: *11th Europ. VLBI Network Symp. & Users Meeting (11th EVN Symp.)*. Bordeaux, France, 9–12 Oct. 2012. DOI: 10.22323/1.178.0103.
- Baan, W., 2011. RFI mitigation in radio astronomy. In: *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2011)*. Istanbul, Turkey, 13–20 Aug. 2011. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6051248.
- Basseville, M., and Nikiforov, I., 1993. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, NJ, USA.
- 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.

21. Vasylieva, I.Y., Zakharenko, V.V., Zarka, P., Ulyanov, O.M., Shevtsova, A.I., and Sereckina, A.A., 2013. Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey. *Odessa Astron. Publ.*, **26**(2), pp. 159–161. DOI: 10.18524/1810-4215.2013.26.82470.
22. Zakharenko, V.V., Ryabov, V.B., Kravtsov, I.P., Mylostna, K.Yu., Kharlanova, V.Yu., Vasylieva, I.Y., Ulyanov, O.M., Konovalenko, O.O., Kalinichenko, M.M., Zarka, P., Rucker, H.O., Fischer, G., Yerin, S.M., Griefsmeier, J.-M., Sydoruchuk, M.A., Shevtsova, A.I., Skoryk, A.O., Shevchenko, V.A., 2021. Sporadic Radio Emission Of Space Objects At Low-Frequencies. *Radio Phys. Radio Astron.*, **26**(2), pp. 99–129. DOI: 10.15407/rpra26.02.099.
23. Cendes, Y., Prasad, P., Rowlinson, A., Wijers, R.A.M.J., Swinbank, J.D., Law, C.J., van der Horst, A.J., Carbone, D., Broderick, J.W., Staley, T.D., Stewart, A.J., Huizinga, F., Molenaar, G., Alexov, A., Bell, M.E., Coenen, T., Corbel, S., Eisloffel, J., Fender, R., Griefsmeier, J.-M., Jonker, P., Kramer, M., Kuniyoshi, M., Pietka, M., Stappers, B., Wise, M., and Zarka, P., 2018. RFI flagging implications for short-duration transients. *Astron. Comput.*, **23**, pp. 103–114. DOI: 10.1016/j.ascom.2018.04.001.
24. 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., 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.
25. Vasylieva, I.Y., 2015. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. *PhD Thesis ed.* Observatoire de Paris [viewed 19 April 2021]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634>.
26. Ross, S.R., 2014. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 5th ed. New York: Wiley.
27. Bertalmio, M., Sapiro, G., Caselles, V., and Ballester, C., 2000. Image inpainting. In: *Proc. 27th Annual Conf. Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 2000)*. New Orleans, LA, USA, 23–28 July 2000, pp. 417–424.
28. Stanislavsky, A.A., Konovalenko, A.A., Koval, A.A., Dorovskyy, V.V., Zarka, P., and Rucker, H.O., 2015. Coronal magnetic field strength from decameter zebra-pattern observations: Complementarity with band-splitting measurements of an associated Type II burst. *Sol. Phys.*, **290**(1), pp. 205–218. DOI: 10.1007/s11207-014-0620-9.
29. Karatzas, I., and Shreve, S.E., 1998. *Brownian Motion and Stochastic Calculus*. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4612-0949-2.
30. Stanislavsky, L.A., Bubnov, I.N., Konovalenko, A.A., Tokarsky, P.L., and Yerin, S.N., 2021. The first detection of the solar U+III association with an antenna prototype for the future lunar observatory. *Res. Astron. Astrophys.*, **21**(8), id. 187. DOI: 10.1088/1674-4527/21/8/187.
31. Bubnov, I.N., Konovalenko, A.A., Tokarsky, P.L., Korolev, O.M., Yerin, S.N., and Stanislavsky, L.A., 2021. Creation and approbation of a low-frequency radio astronomy antenna for studies of objects of the Universe from the Moon's farside. *Radio Phys. Radio Astron.*, **26**(3), pp. 197–210. DOI: 10.15407/rpra26.03.197.

Received 02.06.2022

L.A. Stanislavsky

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

METHODS OF RADIO FREQUENCY INTERFERENCE MITIGATION ON THE STAGE OF PRELIMINARY PROCESSING OF RECEIVED SIGNALS

Subject and Purpose. Methods for computer processing of radio astronomical signals observed with space objects at low frequencies are given. The aim of this paper is to improve the current methods and use their combinations for cleaning records from radio interference of natural and artificial origin in the frequency-time domain, as well as to discuss advantages and disadvantage of the methods.

Methods and Methodology. In the study of records obtained with radio astronomical observations there is a common feature of received signals from space sources, which consists in a significant contribution of radio interference. Having sufficient experience on possible types of interference and distortion of signals on the way of their propagation, the efficiency of suggested procedures, clearing radio signal interference in the frequency-time domain by a combination of different approaches in dependence from typical features of signals with investigated space objects, is shown.

Results. The developed methods of extracting space signals against the background of interference allow one to get unique data on the sources of radio emission in astrophysical phenomena. On the one hand, software tools make it possible to detect very weak events against the background of radio frequency interference. On the other hand, they allow one to measure emission parameters based on the most statistically complete set of events.

Conclusions. The results obtained in this work manifest that there is no universal way to overcome any obstacle in the records of radio astronomical observations because of radio interference. In addition, even if the most appropriate method is applied, it often requires pre-adjustment of the corresponding parameters on which the analysis of physical parameters of radio emission in the area of generation depends. But if such a space signal at the radio records is not very spoiled by interference, the use of considered methods can be successful and useful.

Keywords: radio astronomy observations, RFI mitigation procedures, frequency-time pattern, UTR-2, GURT.