

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ЄРІН СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 520.27:523:98:524.354.4

**НИЗЬКОЧАСТОТНЕ КОСМІЧНЕ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ
ЯК ОБ'ЄКТ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИМ
РАДІОТЕЛЕСКОПОМ НОВОГО ПОКОЛІННЯ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
ТОКАРСЬКИЙ ПЕТРО ЛЬВОВИЧ,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
радіоастрономічної апаратури та методів
спостережень

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
ЛУПІШКО ДМИТРО ФЕДОРОВИЧ,
Науково-дослідний інститут астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України, провідний
науковий співробітник

кандидат фізико-математичних наук
СКУРАТОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «09» жовтня 2020 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «31» серпня 2020р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фіз.-мат. наук, професор

Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Радіоастрономія є досить молодою галуззю фундаментальної науки, що вивчає космічне випромінювання на частотах від 10 МГц до 1 ТГц. Вона народилася у 1932 році завдяки дослідженням Карла Янського і в подальшому набула інтенсивного розвитку, оскільки весь цей час давала важливу інформацію про склад, структуру і розвиток Всесвіту, а також про фізичні процеси, що відбуваються у ньому. Історично склалося так, що космічні випромінювання у нижній частині зазначеного діапазону, а саме, на частотах 10-100 МГц довгий час залишалися малодослідженими через брак радіотелескопів для цих частот. Дійсно, наприкінці минулого століття серед більш, ніж сотні існуючих у світі радіотелескопів лише два з них працювали у низькочастотному діапазоні – це Nançay Decametric Array (NDA) у Франції і УТР-2 в Україні. Хоча останні й постачали унікальну інформацію про природу Всесвіту, яку не можна отримати у інших діапазонах частот, їх обмежена продуктивність дещо стримувала розвиток низькочастотної радіоастрономії. Усвідомлення цього факту спричинило те, що на початку XXI століття у багатьох країнах були ініційовані мегапроекти зі створення нового покоління низькочастотних радіотелескопів, зокрема LOFAR у Європейському Союзі, NenuFAR у Франції, LWA у США, а також глобальний проєкт SKA. В Україні, яка є одним з лідерів з низькочастотної радіоастрономії, також було розроблено власний проєкт низькочастотного радіотелескопа ГУРТ. Всі ці проєкти поєднує те, що їх втілення передбачає використання новітніх розробок у сферах мікроелектроніки, цифрових технологій і техніки активних фазованих антенних решіток (АФАР). Крім того, реалізація цих проєктів вимагає залучення великих технічних та фінансових ресурсів і, триває, як правило, довгі роки, при цьому головні витрати коштів і часу йдуть на будівництво великих АФАР. Зазвичай ці АФАР складаються з окремих субрешіток, що містять в собі від десятків до сотень елементів і мають власні системи керування. Така структура АФАР дозволяє імплементувати радіотелескопи, не чекаючи повного завершення їх будівництва, поетапно додаючи до складу АФАР нові субрешітки. Така практика притаманна усім згаданим проєктам: LOFAR поступово розширювався від центрального ядра радіотелескопа шляхом побудови окремих субрешіток у вигляді віддалених станцій, NenuFAR продовжує поетапно нарощувати свою АФАР вже протягом п'яти років, LWA у США через брак фінансування поки обмежився одною субрешіткою LWA1. Таким чином радіоастрономічні спостереження певний час можуть виконуватися на недобудованих радіотелескопах, АФАР яких складаються з одної чи декількох субрешіток. Такі малорозмірні радіотелескопи нового покоління з одного боку мають низку переваг перед їх попередниками, зокрема більшу ширококутовість та вищі частотну і часову роздільні здатності, а з другого – суттєвий недолік – нижчу кутову роздільну здатність, яка обмежує коло астрофізичних задач, що можуть бути розв'язані за його допомогою. Визначати це коло мають розробники і дослідники кожного з новітніх радіотелескопів окремо, оскільки всі вони різняться між собою за структурою і принципами обробки прийнятої інформації. До таких малорозмірних радіотелескопів поки що належить і радіотелескоп ГУРТ, який повільно будується і поступово вводиться у дію. Наразі

його АФАР складається лише з декількох субрешіток, які мають бути негайно залучені задля радіоастрономічних спостережень. Тому визначення кола астрофізичних досліджень, які можна проводити з його допомогою, є дуже важливою і нагальною задачею. Зокрема, треба оцінити його придатність для дослідження випромінювання Сонця, Юпітера, пульсарів, транзієнтів тощо. Вирішення саме цих *актуальних* завдань є *темою* цієї дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана у відділенні Низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України та є складовою частиною наступних проєктів:

- «Розробка, впровадження і використання додаткових систем гігантського українського радіотелескопа УТР-2 – ГУРТ» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-13, № держ. реєстрації 0113U002653), 2013 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-3, № держ. реєстрації 0113U002048), 2013–2015 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-14, № держ. реєстрації 0114U002823), 2014 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-15, № держ. реєстрації 0115U004084), 2015 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-16, № держ. реєстрації 0116U002877), 2016 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Пошук та вивчення грозових розрядів в атмосферах планет за допомогою найбільших радіотелескопів декаметрового діапазону довжин хвиль» (шифр: БЛИСКАВКА, № держ. реєстрації 0115U004377), 2016 р. (здобувач – керівник);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-4, № держ. реєстрації 0116U002159), 2016–2018 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-17, № держ. реєстрації 0117U002394), 2017 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення математичної моделі великих фазованих антенних решіток та її застосування для калібрування радіотелескопа УТР-2» (шифр: ЕТАЛОН, № держ. реєстрації 0117U006277), 2017–2018 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);

- «Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об'єктів Всесвіту з поверхні Місяця» (шифр: Селена-2, № держ. реєстрації 0118U000564), 2018–2022 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП, № держ. реєстрації 0118U000561), 2018–2022 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Надчутливі ширококутові багатопозиційні радіоспостереження нетеплового випромінювання Всесвіту» (шифр: Всесвіт-2019 № держ. реєстрації 0118U100094), 2018–2019 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр: ФАВОРИТ-5, № держ. реєстрації 0119U100682), 2019–2021 рр. (здобувач – відповідальний виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження різнотипного космічного випромінювання із використанням субрешітки ГУРТ як автономного малого ширококутового низькочастотного радіотелескопа нового покоління.

Для досягнення поставленої мети треба було розв'язати наступні задачі:

1. Детально дослідити параметри, зокрема чутливість малого НЧ радіотелескопа, створеного на базі однієї субрешітки ФАР ГУРТ, задля визначення його придатності для виконання різноманітних радіоастрономічних спостережень.

2. Дослідити добові та довготривалі зміни фонового радіовипромінювання Північного неба шляхом його спостереження з використанням субрешітки ФАР ГУРТ задля експериментальної перевірки її чутливості.

3. Провести спостереження різних видів спорадичного радіовипромінювання потужних космічних джерел, зокрема Сонця і Юпітера, з метою оцінки можливості їх дослідження з використанням субрешітки ФАР ГУРТ.

4. Виконати огляд пульсарів у смузі частот 30–70 МГц за допомогою субрешітки ГУРТ заради оцінки можливості її залучення для дослідження параметрів імпульсного радіовипромінювання пульсарів і властивостей міжзоряного середовища.

Об'єктом дослідження є спорадичне, континуальне й імпульсне електромагнітне випромінювання космічних радіоджерел.

Предметом дослідження є частотно-часові властивості випромінювання космічних сигналів різного походження.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження часової та частотної структури низькочастотного радіовипромінювання космічних об'єктів виконано з використанням методів радіоастрономічних спостережень, що добре себе зарекомендували на радіотелескопах УТР-2 і УРАН. Обробка результатів спостережень і очищення їх від завад проводилась з використанням відомих методів спектральної та статистичної обробки експериментальних даних. Теоретичні дослідження параметрів субрешітки ГУРТ виконувались із

використанням методів електродинамічного комп'ютерного моделювання, теорії рівноважних флуктуаційних процесів в електродинамічних системах, та методів числового аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше виявлено тонку частотно-часову структуру різних типів сплесків спорадичного радіовипромінювання Сонця й Юпітера завдяки унікальним характеристикам низькочастотного малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ – надширокій смузі частот (8-80 МГц), високому розділенню у часі (5...100 мс) та частоті (9 кГц).

2. Вперше одночасно на декаметрових і метрових хвилях зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначено їх густини потоків та з високою точністю (0.006 пк/см^3) виміряні їх міри дисперсії, що доводить унікальну можливість довготривалого моніторингу неоднорідностей міжзоряного середовища із використанням малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ і радіотелескопа УТР-2.

3. Доведено можливість проведення якісних астрофізичних досліджень за допомогою низькочастотних малорозмірних радіотелескопів нового покоління шляхом визначення параметрів континуального, імпульсного, спорадичного, поляризованого космічного радіовипромінювання різноманітних об'єктів Всесвіту (Сонця, планет, міжпланетного і міжзоряного середовища, залишків наднових, пульсарів, радіогалактик, тощо).

4. Вперше детально досліджено параметри субрешітки низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ, зокрема її чутливість, у надширокому діапазоні частот 8-80 МГц із використанням розробленої для неї коректної математичної моделі, яка на відміну від існуючих, бере до уваги всі джерела зовнішніх і внутрішніх шумів з урахуванням впливу ґрунту та взаємних зв'язків між елементами. Коректність моделі підтверджено узгодженням результатів моделювання та результатів проведених натурних вимірювань. Їх результати доводять, що розроблена субрешітка забезпечує перевищення зовнішнього шуму над внутрішнім у 6-10 дБ для всіх її променів, що цілком задовольняє вимогам щодо її застосування для радіоастрономічних спостережень і астрофізичних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів

За результатами дисертаційної роботи отримано нові знання про особливості та параметри радіовипромінювання Сонця та пульсарів у діапазонах декаметрових і метрових хвиль. Результати дисертаційної роботи демонструють значні можливості для астрофізичних досліджень навіть на окремих субрешітках низькочастотних радіотелескопів. Також результати дисертаційної роботи можуть бути використані при проєктуванні нових низькочастотних радіотелескопів і чутливих антен різних застосувань.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці та практичній реалізації моделей активної антени та субрешітки ГУРТ, а також методики розрахунку енергетичних і шумових параметрів антенного елемента та субрешітки ГУРТ, у підготовці, проведенні й обробці результатів натурних вимірювань шумових

параметрів елемента та субрешітки, в активному зборі й аналізі даних наукової літератури за темою дисертації. Автор, в тому числі й самостійно, проводив радіоастрономічні спостереження, що описані у дисертації, також розробив програми аналізу та візуалізації даних спостережень, отриманих за допомогою приймачів ADR радіотелескопа ГУРТ, та результатів їхньої обробки на мові програмування Python 3. Аналіз й обробка експериментальних даних, отриманих за допомогою радіоастрономічних спостережень на радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ, були проведені особисто автором. Також здобувачем було розроблено й апробовано методику довготривалих спостережень на радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ і обробки даних радіовипромінювання пульсарів. Автор брав участь у постановці задач, аналізі, обговоренні й узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків. Також внесок здобувача полягає в опрацюванні матеріалів для публікацій за темою досліджень, підготовці та представленні результатів роботи на конференціях і семінарах.

Автор дуже вдячний своєму науковому керівнику проф., д.ф.-м.н. П. Л. Токарському за допомогу в постановці задач, обговоренні й аналізі отриманих результатів; Радіоастрономічному інституту НАН України (РІ НАНУ) – за можливість проводити дослідження на унікальних радіоастрономічних інструментах; колегам із відділення низькочастотної радіоастрономії РІ НАНУ – за цінні поради при підготовці даної роботи.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах, а також на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2010), Sevastopol, Ukraine, 26–30 September 2010;
- 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012, Warsaw, Poland, 21–23 May 2012;
- 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2012), Sevastopol, Ukraine, 17–21 September 2012;
- 12th Kharkiv young scientists conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2012), Kharkiv, Ukraine, 4–7 December 2012;
- International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), Odesa, Ukraine, 16–20 September 2013;
- 43rd European Microwave Conference (EuMC 2013), Nuremberg, Germany, 6–10 October 2013;
- 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2013), Kharkiv, Ukraine, 2–6 December 2013;
- 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2014), Kharkiv, Ukraine, 15–19 September 2014;
- 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014), Kharkiv, Ukraine, 14–17 October 2014;
- 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), Kharkiv, Ukraine, 21–24 April 2015;
- European Radar Conference (EuRAD), 2015 European Microwave Week, Paris, France, 6–11 September 2015;

- U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V. Kleinheubacher Tagung 2015, Miltenberg, Germany, 28–30 September 2015;
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015), Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September–2 October 2015;
- VIIIth Intern. Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2016), Odesa, Ukraine, 5–9 September 2016;
- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2016), Kharkiv, Ukraine, 10–14 October 2016;
- 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII), Graz, Austria, 25–27 October 2016;
- XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017), Kyiv, Ukraine, 24–27 May 2017;
- European Planetary Science Congress 2017, Riga, Latvia, 17–22 September 2017.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 28 наукових працях: 4 – в наукових фахових виданнях України; 4 – в зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 з яких також входять до бази Web of Science; 17 – публікації апробаційного характеру, 3 – додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінки, основного тексту – 133 сторінки. Вона ілюстрована 64 рисунками, 2 таблицями. Список використаних джерел містить 140 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи.

У **розділі 1** наведено огляд наукової літератури за тенденціями у конструюванні сучасних низькочастотних радіотелескопів та областей застосування субреширок низькочастотних радіотелескопів для астрофізичних досліджень. Показано, що в науковій літературі бракує інформації щодо характеристик сучасних радіотелескопів і, зокрема, їх чутливості та шумових параметрів. Описано конструкцію та принцип роботи базового блоку радіотелескопа ГУРТ – субреширки з 25 активних антенних елементів.

У **розділі 2** запропоновано математичну модель окремого елемента ФАР радіотелескопа – активної антени для розрахунку її енергетичних та шумових параметрів у широкому діапазоні частот. Модель базується на теорії шумних багатополісників та методі моментів, що застосовується у числових дослідженнях дротяних антен. Модель являє собою каскадне з'єднання двох шумних чотириполісників, перший з яких відповідає диполу, а другий – мал шумному антенному підсилювачу (Рис. 1).

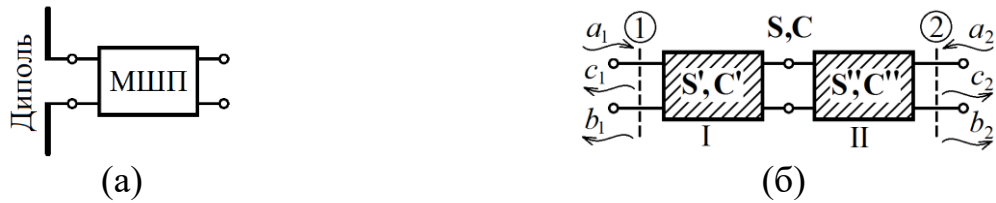


Рис. 1 Схема активної антени (а), та її модель у вигляді з'єднання двох шумних чотирьохполюсників (б)

Для оцінки чутливості системи обрано параметр SEFD (System Equivalent Flux Density), який прийнято використовувати у радіоастрономії:

$$\text{SEFD} = \frac{k_B T_{\text{sys eff}}}{A_e} = \frac{k_B (T_{\text{int eff}} + T_{\text{ext eff}})}{A_e} = \frac{2k_B T_{\text{sky}}}{A_e} \left(1 + \frac{1}{\text{SND}} \right), \quad (1)$$

де: k_B – стала Больцмана;

$T_{\text{sys eff}}$ – повна температура шуму;

A_e – ефективна площа активної антени;

$T_{\text{int eff}}$ – температура внутрішнього шуму;

$T_{\text{ext eff}}$ – температура зовнішнього шуму;

T_{sky} – яскравісна температура галактичного фонового радіовипромінювання;

$\text{SND} = T_{\text{ext eff}} / T_{\text{int eff}}$ – (Sky Noise Dominance) – перевищення зовнішньої шумової температури над температурою внутрішніх шумів системи.

З формули (1) видно, що єдиним шляхом підвищення чутливості для даної антени може бути тільки пониження власних шумів $T_{\text{int eff}}$, а максимум чутливості досягається при $T_{\text{int eff}} = 0$ (ідеальний випадок). Обмежуючим фактором чутливості активної антени стає зовнішній шум, що приймається антеною, зменшити який неможливо. Оптимальним співвідношенням потужності зовнішніх та внутрішніх шумів на виході антени є значення 6...10 дБ у робочій смузі частот.

На основі отриманої моделі було розраховано основні енергетичні та шумові параметри активної антени ГУРТ. Для верифікації моделі активної антени було проведено натурні вимірювання її шумових характеристик. Для вимірювань були вибрані специфічні режими роботи активної антени, у яких вимірювання не представляють великих технічних складнощів: стандартний режим прийому, коли до входу антенного підсилювача під'єднані плечі диполу, режим холостого ходу, коли вхідні клеми антенного підсилювача від'єднані від плечей диполу та режим короткого замикання, коли вхідні клеми антенного підсилювача замкнені накоротко. Останні два режими характеризують рівень власних (внутрішніх) шумів системи та їх взаємодію.

На рис. 2 показані результати розрахунку та результати вимірювань нормованих шумових температур $\tilde{T}_{\text{3sys}}$, $\tilde{T}_{\text{3xx}}$ і $\tilde{T}_{\text{3кз}}$ відповідно для трьох режимів роботи на вході приймача. Графіки показують добре узгодження результатів розрахунку шумових температур з результатами вимірювань, що свідчить про

коректність запропонованих математичної моделі активної антени та методики оцінювання чутливості активних антен.

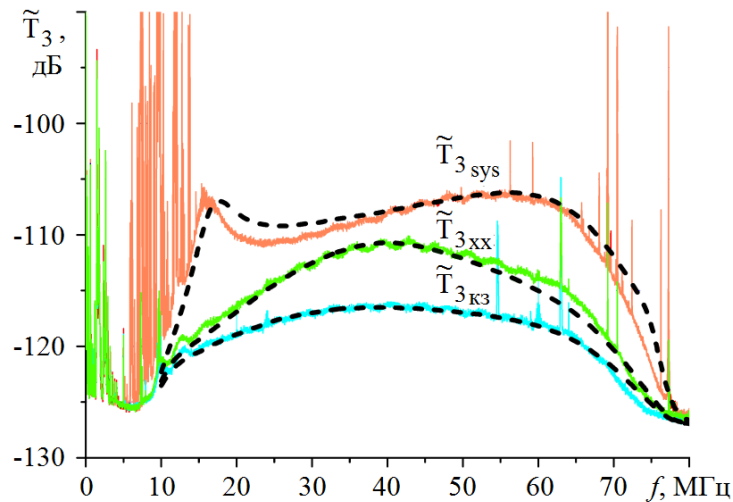


Рис. 2 Результати розрахунку та вимірювань нормованих шумових температур на виході активної антени для різних режимів її роботи

Отриману модель для однієї активної антени було розширено на приймальну активну ФАР, що складається з N антенних елементів та системи фазування, підсилення та збору сигналів від антенних елементів і передачі їх суми до приймача. Аналогічно, активній ФАР поставлено у відповідність шумний багатополіусник (рис. 3а), який має N входів та один вихід. Також виконано декомпозицію багатополіусника на каскадне з'єднання двох багатополіусників: БП-I, який відповідає N -елементній антенній решітці та БП-II, який відповідає її діаграмоутворювальній схемі, що складається з усіх підсилювачів, дискретних фазообертачів та суматорів (рис. 3б).

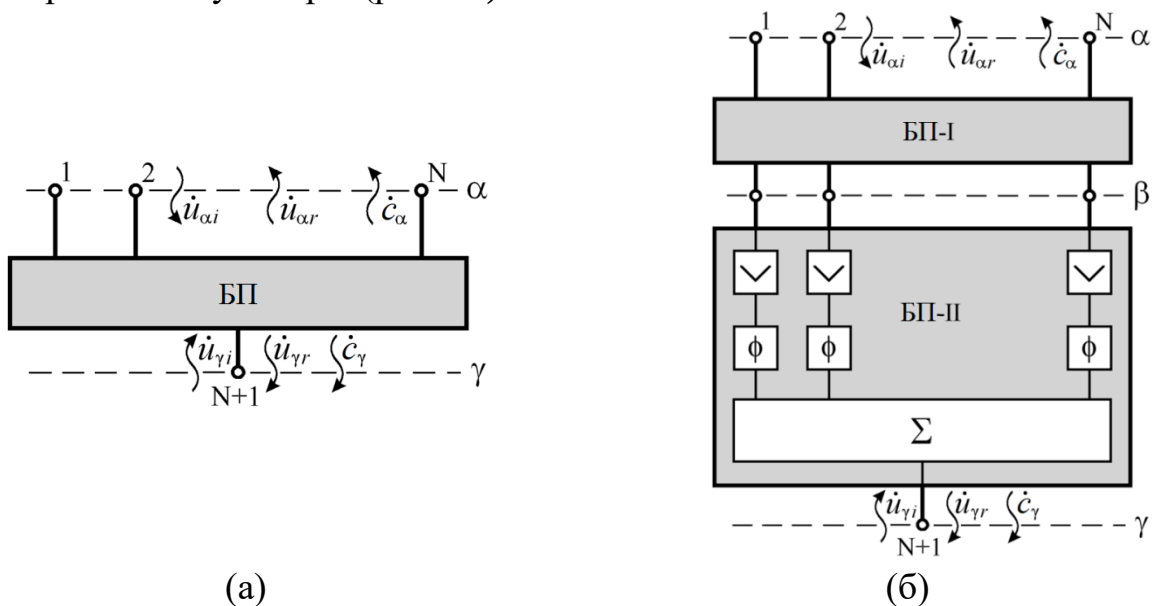
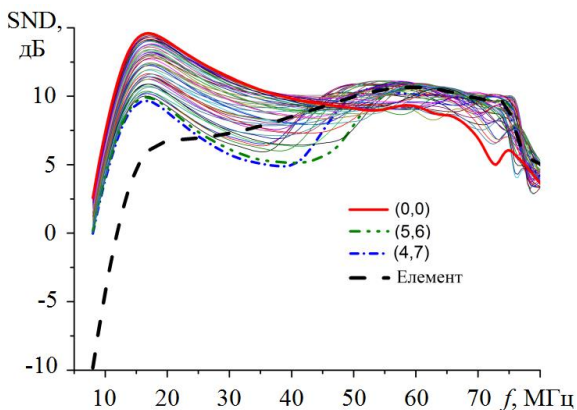


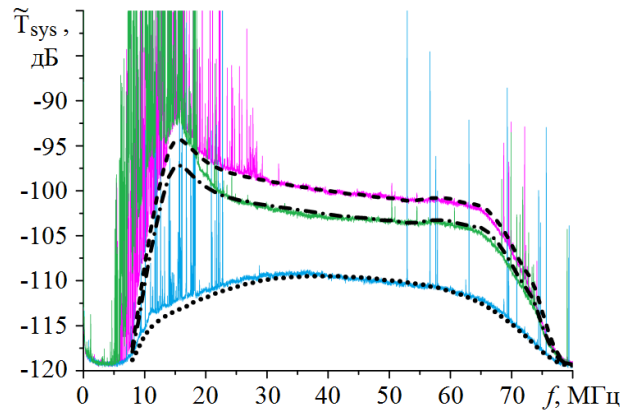
Рис. 3 Багатополіусник, еквівалентний активній ФАР з N антенних елементів (а) та його декомпозиція у каскадне з'єднання двох шумних багатополіусників (б)

За допомогою матричної теорії антенних решіток знайдено вирази для матриці розсіювання S' та коваріаційної матриці спектральних густин шумів C' багатополюсника БП-I, який відповідає антенній решітці. Для БП-II знайдено аналогічні матриці підсилювачів за допомогою комп'ютерного моделювання, а матриці всіх інших його блоків отримано у аналітичній формі. Користуючись формулами теорії багатополюсників, отримано повні матриці для всього багатополюсника, як каскадного з'єднання окремих його частин. Маючи матриці розсіювання та коваріаційні матриці спектральних густин шуму об'єднаного багатополюсника, отримано повну інформацію про внутрішні шуми системи. Коректно врахувавши зовнішні шуми, які обумовлені фоновим радіовипромінюванням Галактики, можливо оцінити чутливість усієї активної ФАР на прикладі ФАР субрешітки радіотелескопа ГУРТ. Для ФАР субрешітки ГУРТ було оцінено чутливість за параметром SND або перевищення рівня зовнішніх шумів над рівнем внутрішніх шумів.

На рис. 4(а) наведено результати числового моделювання частотної залежності SND субрешітки ФАР ГУРТ для всіх 213 можливих напрямів фазування субрешітки. Товстою суцільною лінією показано залежність SND для зенітного напрямку, а чорною штриховою лінією – аналогічна залежність для окремої активної антени. Проаналізовано поведінку цих частотних залежностей та зроблено висновок, що взаємні зв'язки елементів у антенній решітці дають можливість підняти SND на 5-12 дБ на частотах 8-15 МГц в залежності від напрямку фазування, що збільшує чутливість субрешітки у найскладнішому для спостережень діапазоні частот. SND субрешітки без взаємних зв'язків співпадав би із залежністю SND для окремого антенного елемента.



(а)



(б)

Рис. 4 Результати моделювання частотних залежностей SNR субрешітки ФАР ГУРТ для можливих положень променя та для окремого елемента решітки (а), а також результати моделювання та вимірювань нормованої шумової температури на виході субрешітки ГУРТ (б)

Як і у випадку з окремим антенним елементом, для підтвердження коректності математичної моделі були проведені натурні вимірювання шумових характеристик субрешітки. На рис. 4(б) наведено результати моделювання та вимірювань нормованих шумових температур на виході субрешітки, суцільними

лініями показані результати вимірювань, а штриховою, пунктирною та штрих-пунктирною лініями – результати моделювання. В даному випадку нижня пара кривих відповідає результатам моделювання і вимірювання власного шуму субрешітки у разі короткого замкнення клем всіх антенних елементів у субрешітці. Дві верхні пари кривих показують рівень шумів субрешітки при підключених диполях, тобто суміш власних та зовнішніх шумів. Різниця між цими парами кривих обумовлена часом вимірювань, і, відповідно, рівнем зовнішнього шуму, що змінюється з добовим обертанням Землі навколо своєї осі (наведено результати для максимуму та мінімуму фонових галактичного шуму за добу). Результати моделювання та вимірювань добре збігаються майже у всьому робочому діапазоні частот, окрім, хіба що, невеликої смуги частот 8–15 МГц, де антропогенні завади великої потужності роблять неможливим порівняння результатів. Узгодження результатів моделювання та результатів вимірювання шумових параметрів системи дає підставу вважати розроблені моделі коректними, довіряти результатам моделювання в повній мірі і використовувати їх в подальшому для калібрування даних спостережень радіотелескопа ГУРТ.

В результаті моделювання отримано частотні залежності чутливості активної антени та субрешітки ФАР ГУРТ для будь-якого напрямку сканування у всій робочій смузі частот радіотелескопа 8–80 МГц, які показані на рис. 5.

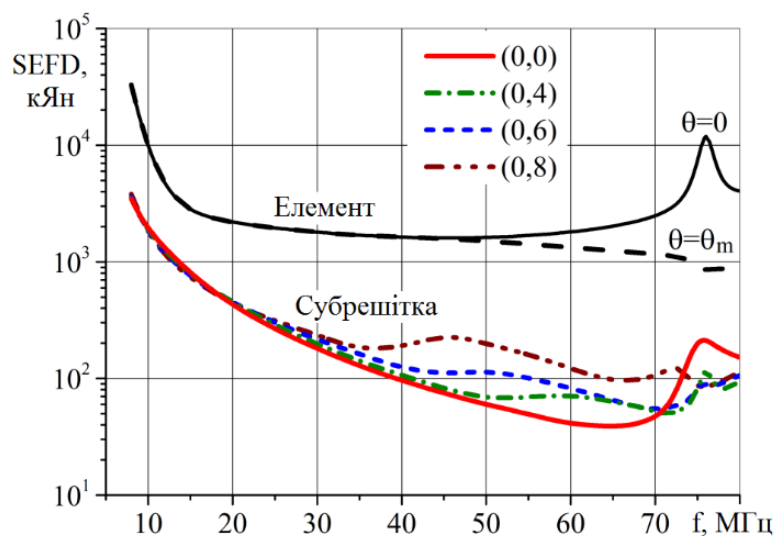


Рис. 5 Частотні залежності параметра SEFD для субрешітки ГУРТ та її елемента

У розділі 3 проведена оцінка можливостей субрешітки ФАР ГУРТ для роботи у якості автономного інструменту астрофізичних досліджень. Важливим фактором, що обмежує можливості спостереження та розділення радіоастрономічних джерел, є ефект плутанини (англ. – confusion effect).

Вплив цього ефекту визначається кутовою відстанню між радіоджерелами континууму, потоки випромінювання від яких є більшими або граничними для виявлення певним радіотелескопом за умови, що ширина діаграми направленості його антени дозволяє розрізнити такі джерела. Розрізнення відбувається як за просторовим (кутова відстань між джерелами, ширина головного променя

діаграми направленості антени радіотелескопа), так і за енергетичним (поток джерел, які може виявити радіотелескоп) критеріями. Малорозмірні антени низькочастотних радіотелескопів не мають достатньої роздільної здатності для ефективного використання просторового критерію, а за таких умов енергетичний критерій також перестає відігравати свою визначальну роль.

Джерела спорадичного, імпульсного, вузько смугового радіовипромінювання не є поширеними та мають унікальні особливості випромінювання у частотній та часовій області. Це дає можливість застосовувати додаткові критерії ототожнення такого радіовипромінювання з його джерелами. Таким чином, до просторового та енергетичного критеріїв розрізнення та ідентифікації додаються частотний і часовий. Ці додаткові критерії найкращим чином проявляються в аналізі радіовипромінювання у часовій та спектральній області із використанням представлення сигналів на динамічних спектрах.

У випадку, коли об'єкт можна однозначно ідентифікувати за виглядом його частотно-часових характеристик випромінювання, обмежуючим фактором стає тільки флуктуаційна чутливість. Для джерел з монохроматичним, імпульсним та спорадичним випромінюванням достатньо обмежитися оцінками флуктуаційної чутливості радіотелескопа, тобто мінімально можливої густини потоку потужності, яку він здатний зареєструвати:

$$\Delta S_{min} = \frac{k_B T_{sys\ eff}}{A_e \sqrt{\Delta f \Delta t n}} = \frac{SEFD}{\sqrt{\Delta f \Delta t n}}, \quad (2)$$

де Δf – смуга частот накопичення сигналу;

Δt – час накопичення сигналу;

n – кількість спостережень.

На основі формули (2) та даних моделювання отримано значення досяжної флуктуаційної чутливості субрешітки ГУРТ для різних джерел космічного випромінювання при відношенні сигнал/шум = 10 у залежності від часу та смуги частот накопичення сигналу, які представлені на рис. 6.

Чутливість та ефективність радіотелескопів на низьких частотах залежать від багатьох чинників, зокрема завадової ситуації, стану іоносфери, тощо. Ці чинники, в свою чергу, залежать від місця розташування радіотелескопа, часу доби спостережень, пори року і. т. п. Сигнальні тракти радіотелескопа мають бути максимально лінійними для того, щоб навіть вузькі за смугою частот але потужні завади не виводили систему у нелінійний режим. Найнадійнішим способом визначення можливостей радіотелескопа є спостереження космічних джерел радіовипромінювання з метою їх вивчення у реальних умовах. Тільки шляхом спостережень на субрешітці ГУРТ можна показати її реальні можливості для астрофізичних досліджень.

Основною складовою шуму системи субрешітки є зовнішній шум, що обумовлений фоновим радіовипромінюванням Галактики. Це радіовипромінювання має неоднорідний розподіл небесною сферою. У декаметровому діапазоні хвиль карту розподілення фонового радіовипромінювання було отримано на радіотелескопі УТР-2. Субрешітка ГУРТ має невелику площу та широку діаграму направленості. При фіксованому

положенні в зенітному напрямку головного променя субрешітки та записі сигналу протягом доби, приймач зафіксує перепад інтегральної інтенсивності фонового радіовипромінювання, що потрапляє у промінь діаграми направленості за рахунок добового обертання Землі навколо своєї осі. Якщо такий перепад проявляється та є стабільним, це означає, що субрешітка чутлива до фонового радіовипромінювання і її системні шуми майже повністю визначаються фоновим шумом Галактики. Те саме можна сказати і про окрему активну антену, однак добовий перепад антенної температури для окремої антени буде нижчим через ширшу діаграму направленості.

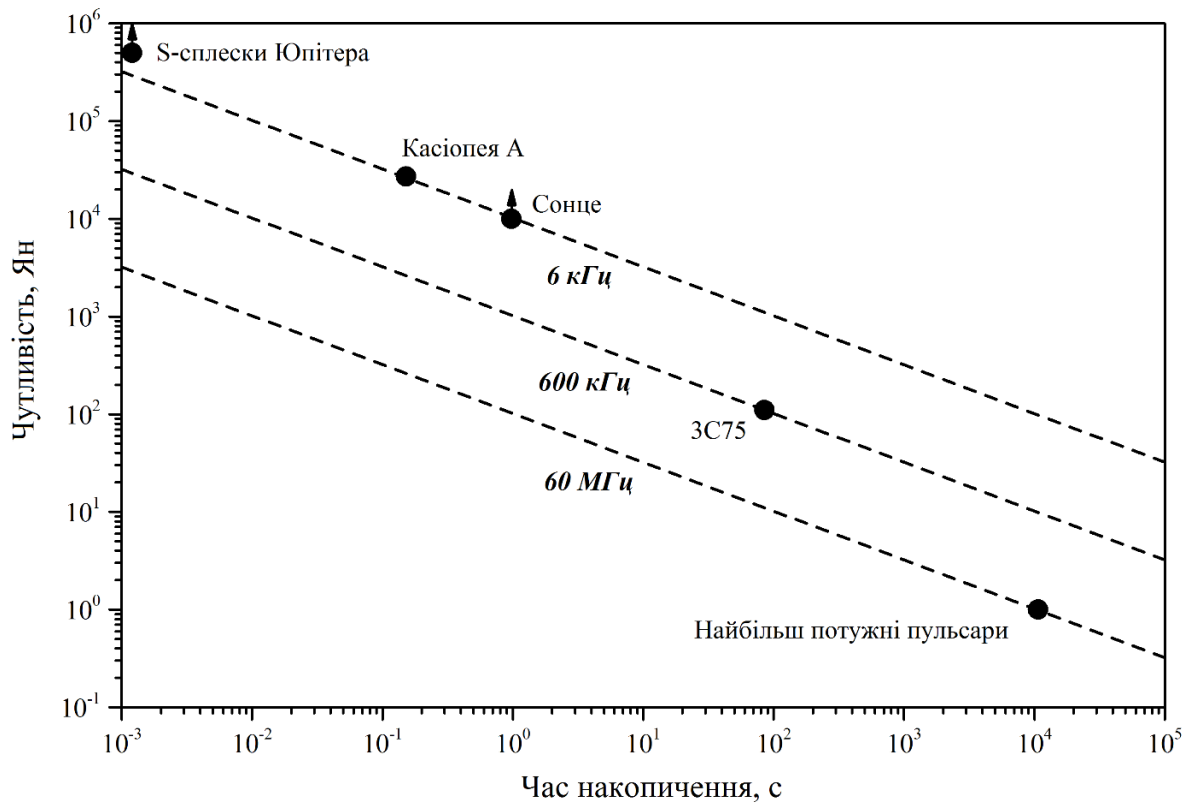


Рис. 6 Досяжна чутливість субрешітки ФАР ГУРТ для реєстрації радіовипромінювання космічних джерел з відношенням сигнал/шум = 10 у залежності від часу та смуги частот накопичення сигналу. Ширини смуг частот у 6 кГц, 600 кГц та 60 МГц показані штриховими лініями

На рис. 7 показані добові зміни антенної температури однієї активної антени ГУРТ та субрешітки з 25 антен, які були отримані 4 лютого 2017 р. Добре видно, що для активної антени добова зміна антенної температури сягає 3 дБ, а для субрешітки – 5 дБ. Ці дані підтверджують чутливість складових елементів радіотелескопа ГУРТ. Також були проведені неперервні записи добових змін антенної температури протягом 2 тижнів, які показали високу стабільність характеристик субрешітки ГУРТ у надширокій смузі частот 8-80 МГц.

На субрешітках ГУРТ проводилися моніторингові спостереження найпотужніших у декаметровому та метровому діапазонах джерел спорадичного радіовипромінювання – Сонця й Юпітера. Якщо радіовипромінювання Юпітера обмежене частотами до 40 МГц, то сонячні сплески різних типів повністю

покривають та виходять за межі робочого діапазону частот ГУРТ. Широкий діапазон частот спостережень відкриває нові можливості для аналізу таких сплесків.

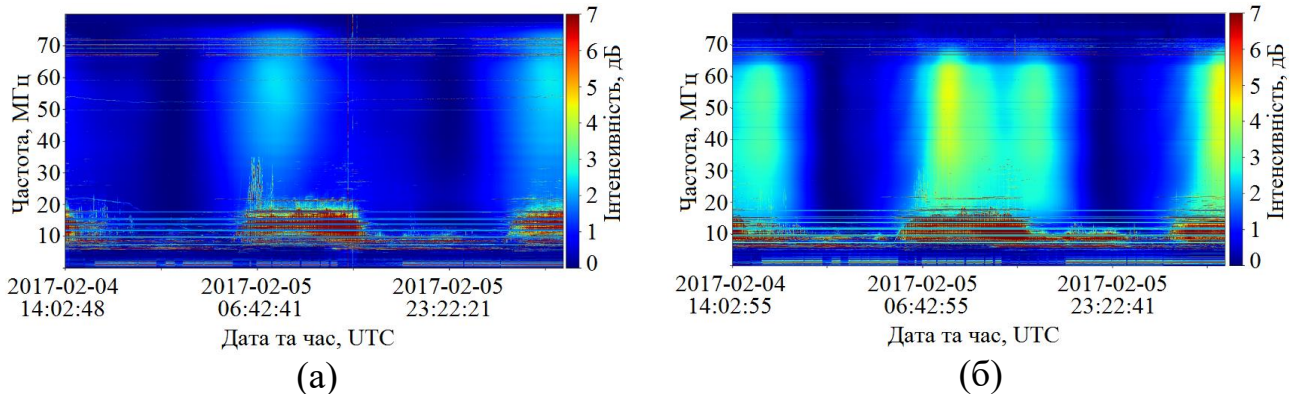


Рис. 7 Динамічні спектри добової зміни антенної температури на вході приймача однієї активної антени (а) та субрешітки ФАР ГУРТ (б)

На рис. 8 наведено динамічний спектр сонячного сплеску U-типу, який було зареєстровано 8 серпня 2012 року. Широкий діапазон частот реєстрації та високе часове розділення дали можливість зафіксувати одразу дві гармоніки сплеску на частотах 25 та 50 МГц. Наявність на динамічному спектрі точок повороту, робить цю пару сплесків цінною з точки зору можливості оцінки реального гармонічного відношення та часової затримки приходу випромінювання першої гармоніки відносно другої. При цьому зміна знаку частотного дрейфу другої гармоніки відбувається на 7,5 с раніше ніж першої. Оскільки плазмовий механізм випромінювання передбачає формування основної та другої гармоніки одночасно та в одному місці, то затримка, що спостерігається, може виникнути при поширенні хвилі від джерела до спостерігача.

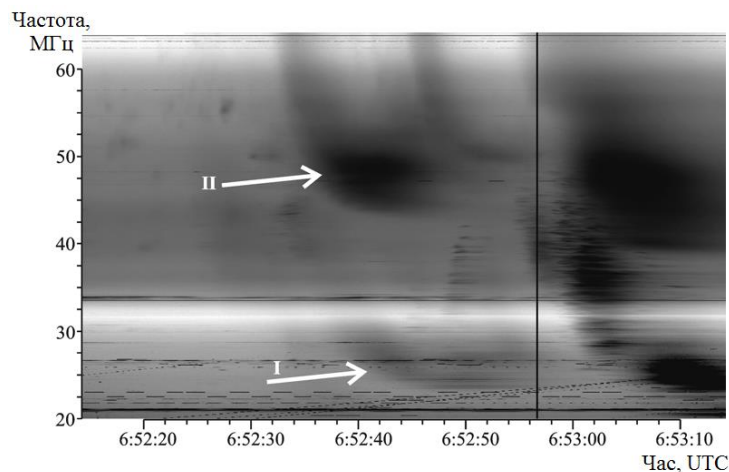


Рис. 8 Динамічний спектр сонячного сплеску U-типу з двома гармоніками зареєстрований на субрешітці ГУРТ

Розширення діапазону частот порівняно з радіотелескопом УТР-2, значно збільшує можливості досліджень, причому для потужних сонячних сплесків мала ефективна площа субрешітки ГУРТ не є серйозним недоліком. На рис. 9 для порівняння наведено динамічні спектри сонячного сплеску II типу отримані

одночасно на радіотелескопі УТР-2 та субрешітці ГУРТ. Перевищення амплітуди сплеску над фоновим випромінюванням у субрешітці ГУРТ менше, але тільки завдяки широкій смузі частот ГУРТ можна дослідити другу гармоніку випромінювання. Добре видно тонку та ялинкоподібну структуру сплеску, що притаманна сплескам цього типу та дрейф частоти випромінювання від високих до низьких частот, який свідчить про віддалення джерела випромінювання від центра Сонця.

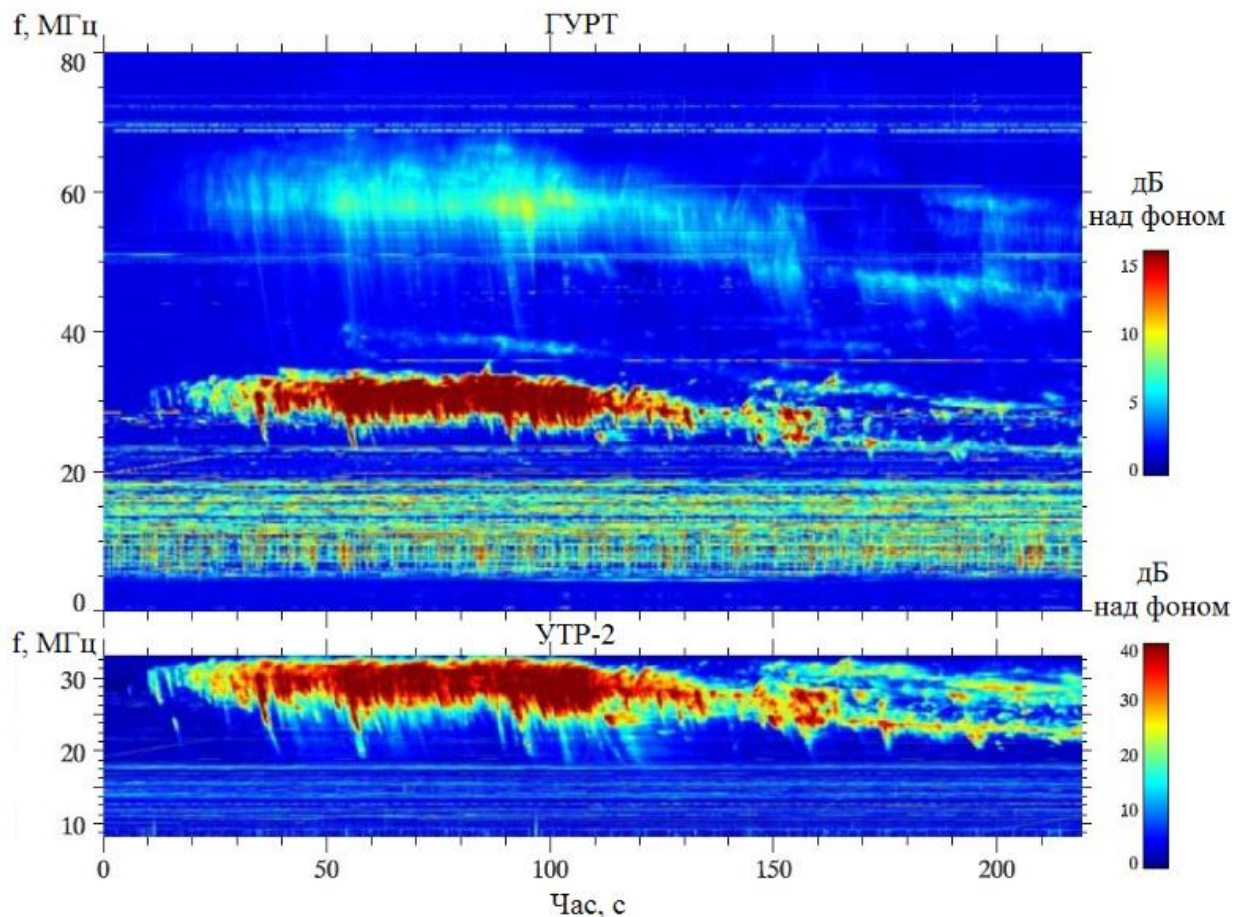


Рис. 9 Динамічний спектр сонячного сплеску типу II з двома гармоніками зареєстрований на субрешітці ГУРТ (верхня панель) та радіотелескопі УТР-2 (нижня панель)

Вперше на малому радіотелескопі – субрешітці ГУРТ, та на одній активній антені зареєстровано сплески типу дрейфуюча пара. Цей вид сплесків зустрічається не часто, виникає у широкій смузі частот та не має докладного пояснення фізичної природи процесу його генерування. Спостереження таких сплесків проводилося 12 липня 2017 року під час бурі сонячних радіосплесків. Сплески реєструвалися одночасно радіотелескопами УТР-2, УРАН-2, субрешіткою ГУРТ та однією активною антеною ГУРТ. На рис. 10 наведено динамічні спектри сплесків типу дрейфуюча пара, зареєстрованих на субрешітці та активну антену ГУРТ. Видно, що для активної антени відношення сигнал/шум набагато менше, але можливість вивчення таких сплесків залишається. Підрахунком встановлено що за день 12 липня на динамічних спектрах, отриманих за допомогою субрешітки радіотелескопа ГУРТ у частотному діапазоні 30–70 МГц, кількість дрейфуючих пар

дорівнює 2602, з яких 2178 зі зворотнім частотним дрейфом, а 424 – з прямим. Таким чином доповнено статистику появи таких сплесків на Сонці у 2017 р.

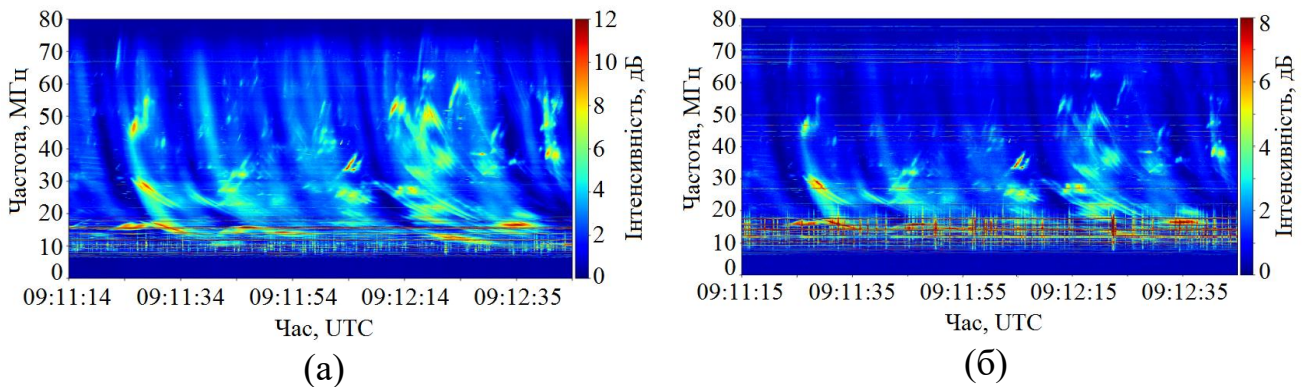


Рис. 10 Динамічні спектри сплесків сонячного радіовипромінювання, де серед інших типів можна виділити сплески типу «дрейфуюча пара», прийняті за допомогою субрешітки ГУРТ (а) та однієї активної антени (б)

У розділі 4 представлено дослідження радіовипромінювання пульсарів за допомогою субрешітки ГУРТ. Радіовипромінювання пульсарів має імпульсний характер та малі густини потоків, але висока точність періоду повторення імпульсів та компенсація дисперсійної затримки, яка виникає внаслідок поширення сигналу крізь міжзоряне середовище, дають можливість накопичувати імпульси у часі та широкій смузі частот і отримувати усереднені профілі імпульсів, які є унікальними характеристиками кожного пульсару.

Першим етапом досліджень став огляд відомих найближчих до Землі пульсарів з найбільшими густинами потоків випромінювання у смузі частот 30–70 МГц. Така смуга частот була обрана виходячи з наступних факторів:

- відношення густини потоку пульсару до яскравісної температури фону Галактики найбільше у робочому діапазоні частот ГУРТ;
- найменша кількість та інтенсивність штучних радіозавад;

На основі програм для обробки даних спостережень пульсарів на радіотелескопі УТР-2 було створено програми для читання, очистки від завад, визначення і компенсації міри дисперсії та усереднення даних, отриманих на приймачах радіотелескопа ГУРТ. За 2016–2017 роки було проведено огляд 36 найпотужніших пульсарів, серед яких зареєстровано випромінювання 16 пульсарів. Перелік зареєстрованих пульсарів, їх міри дисперсії та оцінки густини потоків їх радіовипромінювання наведені у табл. 1. Накопичення сигналу проводилося у смузі частот 30–70 МГц та протягом 2–4 годин у часі.

Беручи до уваги, що за допомогою найбільшого в світі за ефективною площею у декаметровому діапазоні радіотелескопа УТР-2 було зареєстровано всього трохи більше 40 пульсарів у суміжному діапазоні частот 16–33 МГц, 16 детектованих пульсарів на субрешітці ГУРТ, яка складається всього лише з 25 активних антен, є хорошим показником ефективності даної субрешітки. Цей факт доводить високу чутливість розробленої системи та показує її можливості для проведення радіоастрономічних досліджень. Отримані значення відношення

сигнал/шум для деяких пульсарів дають можливість проводити вивчення їх параметрів з достатньою надійністю.

Таблиця 1

Зареєстровані за допомогою субрешітки ГУРТ пульсари та їх параметри

№	Назва пульсара	DM , пк/см ³	С/Ш, рази	Період, с	Густина потоку, мЯн	
					Субрешітка ГУРТ	З робіт Stovall / Ізвекова *
1	B0031-07	10.896	6	0.943	320 (160)	6370 (3190)
2	B0320+39	26.082	5	3.032	300 (150)	220 (110) 230* (120)* [61 МГц]
3	B0329+54	26.780	24	0.714	1190 (600)	4160 (2080)
4	B0809+74	5.752	22	1.292	1280 (640)	1870* (350)* [61 МГц]
5	B0823+26	19.475	14	0.531	350 (180)	450 (230)
6	B0834+06	12.858	44	1.274	1550 (780)	4680 (2340)
7	B0919+06	27.325	5	0.431	810 (410)	770* (160)* [85 МГц]
8	B0943+10	15.330	17	1.098	470 (240)	1290* (350)* [61 МГц]
9	B0950+08	2.970	36	0.253	1470 (740)	2330* (620)*[102.5 МГц]
10	B1133+16	4.487	15	1.188	6000 (3000)	4710 (2360)
11	B1237+25	9.260	4	1.382	170 (90)	510 (250)
12	B1508+55	19.623	15	0.740	2000 (1000)	2130 (1060)
13	B1822-09	19.408	5	0.769	3100 (1550)	2220 (1110)
14	B1919+21	12.431	42		3000 (1500)	2100* (430)* [61 МГц]
15	B2016+28	14.176	5	0.558	270 (140)	590 (290)
16	B2217+47	43.548	13	0.538	750 (380)	10100 (5050)

Пульсари відомі нестабільністю потоку випромінювання, особливо на низьких частотах. Причинами такої нестабільності можуть бути багато факторів, від процесів у самих пульсарах до змін сигналу у земній іоносфері. Постійний моніторинг густин потоків цих джерел може дати відповідь на питання про причини та механізми зміни їх величини, а також, точніше визначити значення густини потоку.

Унікальне розташування двох радіотелескопів УТР-2 і ГУРТ на одній обсерваторії, і відповідно в одних іоносферних умовах, дає можливість оцінити густину потоку радіовипромінювання пульсарів у широкій смузі частот.

У 2017 році проведено серію систематичних одночасних спостережень пульсарів на радіотелескопах УТР-2 і ГУРТ протягом двох тижнів. Для

спостережень обрано пульсари B1133+16, B1508+55 і B1919+21. Час спостереження та накопичення сигналу одного пульсара було обрано рівним 4 годинам. Таким чином, за добу спостережень у 12 годин найбільш прийнятних виходячи з заводової обстановки, проводився запис даних 3 пульсарів.

Спостереження пульсарів проводилися у дві сесії, перша з 10 по 17 квітня, а друга – 15, 16, 17, 20, 21 травня 2017 року. Дані за першу сесію спостережень дали доволі нестабільні результати оцінки густин потоків, особливо для УТР-2. У другій сесії було вирішено додатково реєструвати сигнал, прийнятий окремими секціями радіотелескопа УТР-2. Секція УТР-2 має доволі широкий промінь діаграми направленості, порівняний за шириною з променем субрешітки ГУРТ. Така її ширина дає можливість виключити вплив зміни напрямку поширення випромінювання внаслідок іоносферної рефракції. Приклад накопиченого у часі та у смузі частот імпульсу пульсара B1133+16 показано на рис. 11.

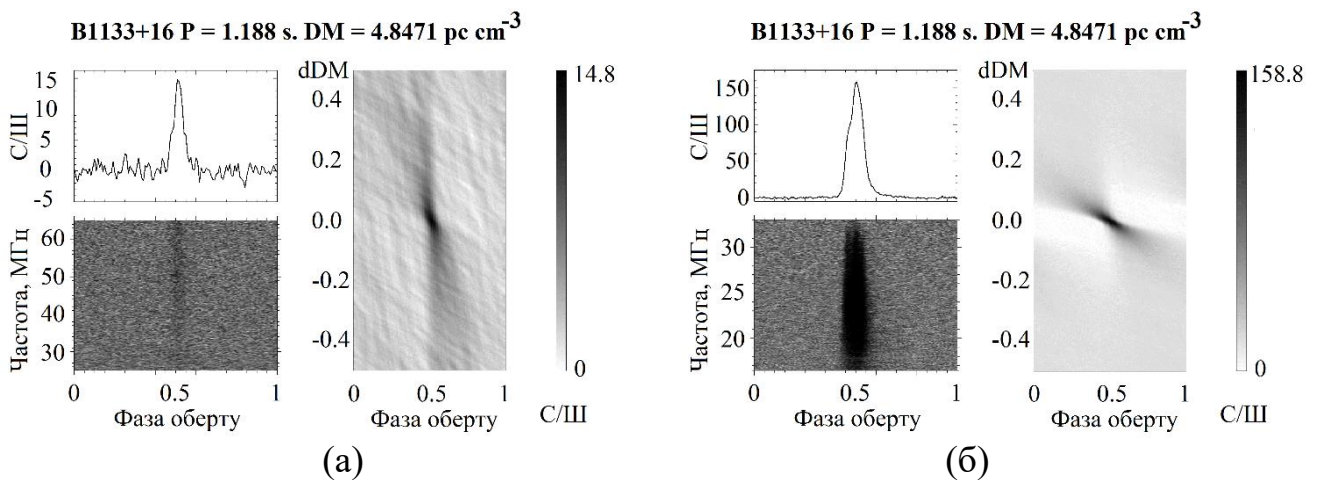


Рис. 11 Результати обробки даних спостережень пульсара B1133+16 на субрешітці ГУРТ (а) та на радіотелескопі УТР-2 (б) у режимі додавання сигналів від плечей радіотелескопа (результати близькі до середніх за сесію спостережень на даному телескопі)

Результати оцінок густин потоків пульсарів B1133+16, B1508+55, B1919+21 для кожного дня спостережень за допомогою секцій радіотелескопа УТР-2, повного радіотелескопа УТР-2 та субрешітки ГУРТ наведені на рис. 12. На рисунках добре прослідковується частотна залежність густини потоку для різних пульсарів у суміжних робочих діапазонах радіотелескопів. Для пульсара B1919+21 видно, що для окремих секцій УТР-2 зміна густини потоку не така явна, як для всього радіотелескопа. Це може свідчити про вплив іоносферної рефракції на напрям поширення радіовипромінювання і його не попадання у вузький промінь повного радіотелескопа.

Також, на рис. 12 показані залежності зміни автоматично визначеної міри дисперсії, які від дня до дня лежать у межах інтервалу похибок. Для більш детальних висновків необхідні тривалі спостереження, що потребують значних ресурсів (часу роботи радіотелескопа, пристроїв зберігання інформації, потужності комп'ютерів для обробки даних, людських ресурсів, тощо)

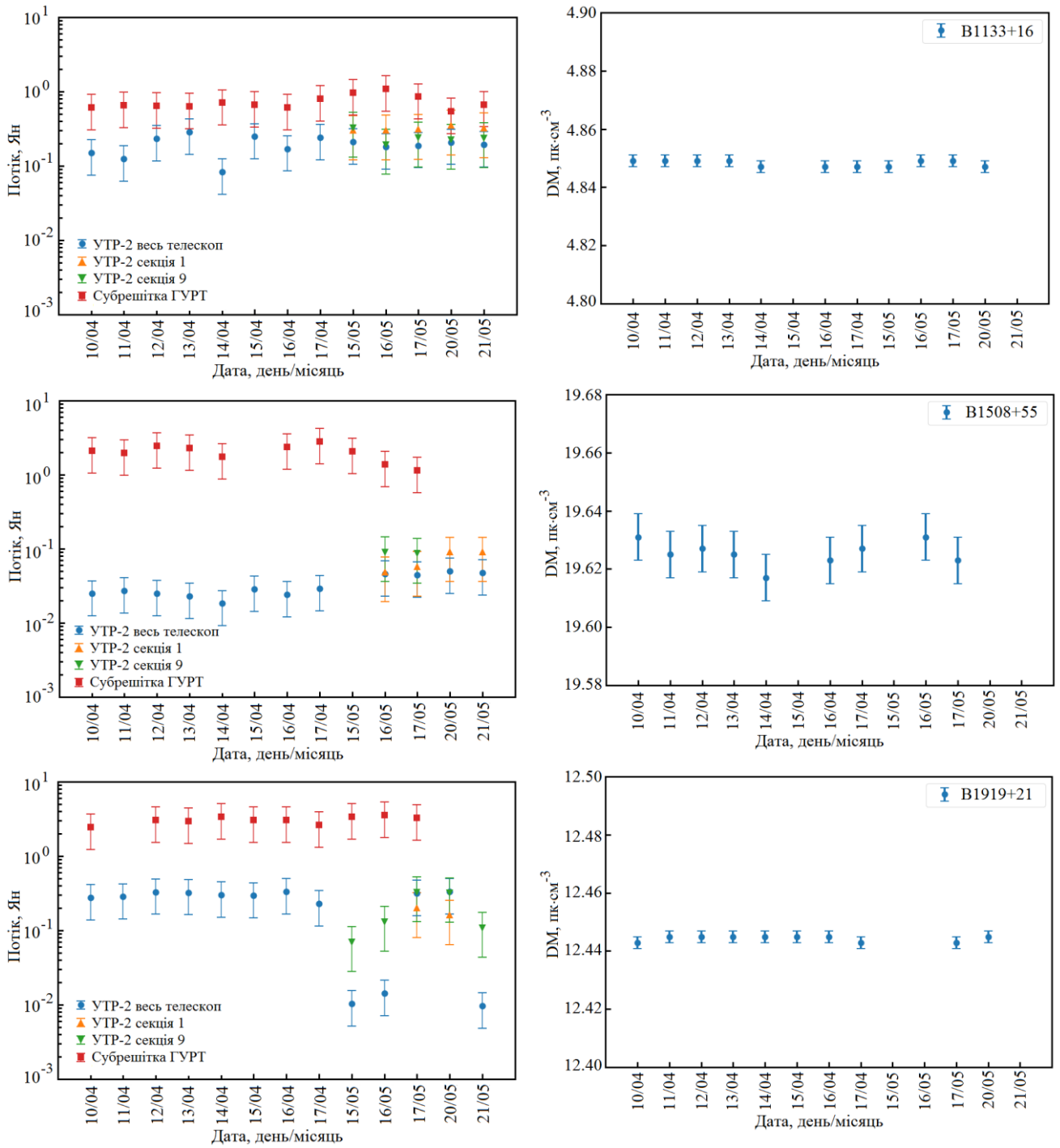


Рис. 12 Оцінки потоків (зліва) та варіації величини міри дисперсії (справа) усереднених за 4 години імпульсів пульсарів B1133+16, B1508+55 та B1919+21 як залежності від дати спостережень

ВИСНОВКИ

У результаті проведених комплексних досліджень була повністю досягнута головна мета даної дисертаційної роботи: показано можливості радіоастрономічних спостережень та астрофізичних досліджень за допомогою малорозмірних широкосмугових антенних решіток сучасних радіотелескопів. За допомогою числового моделювання отримано характеристики субрешітки нового низькочастотного радіотелескопа ГУРТ. Коректність створеної моделі підтверджено зіставленням результатів натурних вимірювань та результатів моделювання. В широкій смузі частот досліджено фонове галактичне випромінювання, спорадичні радіовипромінювання Сонця та Юпітера різноманітних типів, а також імпульсне радіовипромінювання пульсарів.

Отже, головні оригінальні результати роботи такі:

1. Вперше виявлено тонку частотно-часову структуру сплесків спорадичного радіовипромінювання Сонця та Юпітера різних типів завдяки унікальним характеристикам низькочастотного малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ – надширокій смузі частот (8-80 МГц), високому розділенню у часі (5...100 мс) та частоті (9 кГц).

2. Вперше одночасно на декаметрових і метрових хвилях зареєстровано імпульсне радіовипромінювання 16 пульсарів, визначено їх густини потоків та з високою точністю (0.006 пк/см^3) виміряні міри дисперсії, що доводить унікальну можливість довготривалого моніторингу неоднорідностей міжзоряного середовища із використанням малорозмірного радіотелескопа – субрешітки ГУРТ та радіотелескопа УТР-2.

3. Доведено можливість проведення якісних астрофізичних досліджень за допомогою низькочастотних малорозмірних радіотелескопів нового покоління шляхом визначення параметрів континуального, імпульсного, спорадичного, поляризованого космічного радіовипромінювання різноманітних об'єктів Всесвіту (Сонця, планет, міжпланетного і міжзоряного середовища, залишків наднових, пульсарів, радіогалактик, тощо).

4. Вперше детально досліджено параметри субрешітки низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ, зокрема її чутливість, у надширокому діапазоні частот 8–80 МГц із використанням розробленої для неї коректної математичної моделі, яка на відміну від існуючих, бере до уваги всі джерела зовнішніх і внутрішніх шумів з урахуванням впливу ґрунту та взаємних зв'язків між елементами. Коректність моделі підтверджено відповідністю результатів моделювання та проведених натурних вимірювань. Їх результати доводять, що розроблена субрешітка забезпечує перевищення зовнішнього шуму над внутрішнім у 6-10 дБ для всіх її променів, що цілком задовольняє вимогам щодо її застосування для радіоастрономічних спостережень і астрофізичних досліджень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Бубнов И. Н., Гридин А. А., Шевчук Н. В., Фалькович И. С., Коваль А. А., Руткевич Б. П., Резник А. П., Рукер Х. О., Панченко М., Белов А. С., Христенко А. Д., Квасов Г. В., **Ерин С. Н.** Наблюдения солнечного U-всплеска в полосе частот 10–70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 2. С. 101–106. (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешиці радіотелескопа ГУРТ).
2. **Ерин С. Н.**, Токарский П. Л., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Резник А. П. Диаграммообразующий модуль для секции антенной решетки радиотелескопа ГУРТ декаметрового и метрового диапазонов волн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19, № 3. С. 240–248. (Особистий внесок здобувача: проведення вимірювань характеристик діаграмотворного модуля, обробка отриманих даних, написання статті).
3. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н. Шумовая температура активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23, № 1. С. 43–59. (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання структури субрешитки, проведення вимірювань шумових характеристик антенної решітки, обробка даних, участь у створенні програм обробки даних, написання статті).
4. Захаренко В. В., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Васильева Я. Ю., Ульянов О. М., Яцына В. Ю. Исследования радиоизлучения пульсаров с помощью секции радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23, № 3. С. 147–165. (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешитках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання статті).

Наукові праці в зарубіжних спеціалізованих виданнях:

5. 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., Ivantyshin 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. *Experimental Astronomy*. 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. (SCOPUS, Web of Science). (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешитках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті).
6. 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., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskyi 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., Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 05, Is. 04. P. 1641010. (SCOPUS, Web of Science). (Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешитках ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті).
 7. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Mutual coupling between antennas used as elements of a phased antenna array for the decametric wave radio telescope. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, No. 4. P. 285–295. (SCOPUS). (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у створенні програм обробки даних, написання статті).
 8. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., **Yerin S. N.** Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65, Is. 9. P. 4636–4644. (SCOPUS, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, вимірювання шумових характеристик субрешитки ГУРТ, написання статті).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Konovalenko A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** The directivity characteristics of an antenna array receiving the UWB signal // *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of the Vth International Conference*, 26–30 Sept. 2010, Sevastopol, 2010. P. 249–251. (Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні статті).
10. **Yerin S. N.**, Gridin A. A., Tokarsky P. L. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope // *Microwaves, Radar and Wireless Communications : Proceedings of the 19th International Conference*, 21–23 May 2012, Warsaw, Poland, 2012. P. 715–717. (Особистий внесок

здобувача: проведення вимірювань характеристик фазообертачів, участь у розробці моделі, обробка даних, участь в написанні статті).

11. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Gridin A. A., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** UWB active antenna array for low frequency radio astronomy // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of the VIth International Conference, 17–21 Sept. 2012, Sevastopol, 2012. P. 39–43. (*Особистий внесок здобувача: участь у моделюванні характеристик субрешилки ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті*).
12. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Matrix approach to estimation of phased antenna array efficiency placed near air-ground interface // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : Proceedings of the 12-th Kharkiv Young Scientists Conference, 4–7 Dec. 2012, Kharkiv, 2012. P. RAA-1. (*Особистий внесок здобувача: обробка даних, участь у написанні статті*).
13. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Mutual coupling between antennas used as array elements of a low frequency radio telescope // Antenna Theory and Techniques : Proceedings of the International Conference, 16–20 Sept. 2013, Odesa, 2013. P. 269–272. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні статті*).
14. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** A multiport approach to modelling of phased antenna array for radio astronomy // European Microwave Conference : Proceedings of the 43rd International Conference, 6–10 Oct. 2013, Nuremberg, Germany, 2013. P. 1651–1654. (*Особистий внесок здобувача: участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті*).
15. **Yerin S. N.**, Tokarsky P. L. Potential characteristics of subarray with discrete phase shifters for phased antenna array of GURT radio telescope // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : 13th Kharkiv Young Scientists Conference, 2–6 Dec. 2013 : abstr. Kharkiv, 2013. P. A1. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь в написанні тез доповіді*).
16. Konovalenko O. O., Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Effective area of phased antenna array of GURT radio telescope // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : Proceedings of the VIIth International Conference, 15–19 Sept. 2014, Sevastopol, 2014. P. 25–29. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь в написанні статті*).
17. Tokarsky P. L., **Yerin S. N.** Accurate analysis of subarray characteristics for GURT low-frequency radio telescope // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : Proceedings of the 14th Kharkiv Young Scientists Conference, 14–17 Oct. 2014, Kharkiv, 2014. P. A5. (*Особистий внесок здобувача: участь у розробці моделі та методики розрахунків, обробка даних, участь в написанні статті*).
18. Konovalenko A., Zarka P., Sodin L., Zakharenko V., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Stanislavsky A., Kalinichenko N., Koliadin V., Melnik V., Dorovskyy V., Shepelev V., Koval A., Bubnov I., **Yerin S.**, Vasylieva I., Gridin A., Kulishenko V., Reznik A., Reznichenko A., Kvasov G., Mukha D., Khristenko A., Litvinenko G., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Ryabov V., Mann G.,

- Brazhenko A., Koshovyy V. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine // Antenna Theory and Techniques : Proceedings of the Xth International Conference, 21–24 Apr. 2015, Kharkiv, 2015. P. 8–12. (*Особистий внесок здобувача: підготовка допоміжних матеріалів та ілюстрацій, участь в написанні статті*).
19. **Yerin S. N.**, Konovalenko A. A., Khristenko A. D., Gridin A. A., Reznik A. P., Kvasov G. V. Signal delivery system in a subarray of Giant Ukrainian Radio Telescope // Antenna Theory and Techniques : Proceedings of the Xth International Conference, 21–24 Apr. 2015, Kharkiv, 2015. P. 190–192. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні вимірювань характеристик субрешилки ГУРТ, обробка даних, написання статті*).
 20. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H. O., Mann G., Zakharenko V., Ulyanov O., Melnik V., Kalinichenko N., Panchenko M., Stanislavskiy A., Litvinenko G., Sidorchuk M., Stepkin S., Kolyadin V., Tokarskiy P., **Yerin S.**, Bubnov I., Brazhenko A. Multi-telescope synergy in the low-frequency radio astronomy for the solar, planetary and heliospheric studies // U.R.S.I. Kleinheubacher Tagung : Proceedings of the International Conference, 28–30 Sept. 2015, Miltenberg, Germany, 2015. P. 50. (*Особистий внесок здобувача: участь у спостереженнях на радіотелескопі УТР-2 та ГУРТ, участь у підготовці доповіді*).
 21. **Yerin S.**, Tokarsky P., Bubnov I., Konovalenko A. Variation of phasing system parameters of GURT active antenna subarray in a wide scan range // Applied Physics : Proceedings of International Young Scientists Forum, 29 Sept.–2 Oct. 2015, Dnipropetrovsk, 2015. P. RAA-1. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, обробка даних, участь у написанні статті*).
 22. Zakharenko V., **Yerin S.**, Bubnov I., Vasilieva I., Kravtsov I. Using of pulsar spectra catalogue at frequencies below 80 MHz for astronomical calibration of phased antenna arrays // Applied Physics and Engineering : Proceedings of International Young Scientists Forum, 10–14 Oct. 2016, Kharkiv, 2016. P. RAA-5. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешиці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання статті*).
 23. Cecconi B., Zarka P., Savalle R., Le Sidaner P., Coffre A., Denis L., Viou C., Konovalenko A. A., Skoryk A., **Yerin S.**, Kasaba Y., Kumamoto A., Misawa H., Tsuchiya T., Hobara Y., Nakajo T., Imai K., Ryabov V., Rothkaehl H., Orton G. S., Momary T., Griessmeier J.-M., Imai M., Girard J., Lamy L., Anderson M., André N., Génot V., Ebert R., Carozzi T., Kimura T., Kurth W., Higgins C., Mugler J., Typinsky D., Clarke T., Sky J., Flagg R., Reyes F., Greenman W., Brown J., Mount A., Ashcraft T., Thieman J., Reeve W., Fung S., Towne N., King T., Bolton S. Juno-ground-radio observations support // Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII) : Proceedings of 8th International Workshop, 25–27 Oct. 2016, Graz, Austria, 2016. P. 28. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2 та субрешиці ГУРТ, обробка даних, участь у створенні програм обробки та бази даних спостережень*).
 24. Konovalenko A., Tokarsky P., Bubnov I., **Yerin S.** SNRs of two active antenna designs: Inverted V vs horizontal dipole // Antenna Theory and Techniques :

Proceedings of the XIth International Conference, 24–27 May 2017, Kyiv, 2017. P. 224–227. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті*).

25. Konovalenko A., Tokarsky P., **Yerin S.** Effect of the ground screen on sensitivity of low-frequency radio telescope array element // Antenna Theory and Techniques : Proceedings of the XIth International Conference, 24–27 May 2017, Kyiv, 2017. P. 186–189. (*Особистий внесок здобувача: участь у обробці даних, участь у створенні програм обробки, участь в написанні статті*).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

26. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.** Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 2. С. 142–153. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання антенної решітки, обробка даних, участь у створенні програм обробки, написання статті*).
27. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21, № 1. С. 48–57. (*Особистий внесок здобувача: проведення електродинамічного моделювання, вимірювання шумових характеристик антенного елемента, обробка даних, написання статті*).
28. Коноваленко А. А., **Ерин С. Н.**, Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на субрешітках радіотелескопа ГУРТ, обробка даних, створення програм візуалізації і обробки даних, написання статті*).

АНОТАЦІЯ

Єрін С. М. Низькочастотне космічне радіовипромінювання як об'єкт спостереження широкосмуговим радіотелескопом нового покоління. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню спорадичного та імпульсного радіовипромінювання об'єктів Всесвіту у декаметровому та метровому діапазоні хвиль. Розроблено математичну модель антенного елемента і субрешітки радіотелескопа ГУРТ, отримано їх шумові та енергетичні характеристики. Адекватність розробленої математичної моделі підтверджено за допомогою натурних вимірювань шумових параметрів антенного елемента та субрешітки ГУРТ.

На основі отриманих в результаті моделювання даних з чутливості, проведено оцінку можливостей для радіоастрономічних спостережень радіоджерел різних типів випромінювання. Проведено велику кількість спостережень, під час яких зафіксовано радіовипромінювання Сонця (типів II, III, IIIb, IV, U, дрейфуюча пара), Юпітера (L- та S-сплески), галактичного фону та пульсарів.

Вперше за допомогою антенної субрешітки, що складається з 25 активних антен, зареєстровано радіовипромінювання 16 пульсарів у діапазоні частот 30-70 МГц. Проведено серію одночасних спільних спостережень пульсарів у надширокому діапазоні частот за допомогою радіотелескопа УТР-2 та субрешіток радіотелескопа ГУРТ. Визначено густини потоків радіовипромінювання пульсарів у даному діапазоні, а також міри дисперсії кожного пульсара.

Таким чином, досліджено континуальне, спорадичне та імпульсне радіовипромінювання об'єктів Всесвіту за допомогою малого низькочастотного радіотелескопа нового покоління.

Ключові слова: Сонце, Юпітер, пульсари, радіовипромінювання, радіотелескоп, активна антена, антенна решітка, чутливість, ГУРТ.

АННОТАЦИЯ

Ерин С. Н. Низкочастотное космическое радиоизлучение как объект наблюдения широкополосным радиотелескопом нового поколения. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины; Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины. – Харьков, 2020.

Диссертация посвящена исследованию спорадического и импульсного радиоизлучения объектов Вселенной в декаметровом и метровом диапазоне волн. Разработана математическая модель антенного элемента и субрешетки радиотелескопа ГУРТ, получены их шумовые и энергетические характеристики. Адекватность разработанной математической модели подтверждена с помощью

натурных измерений шумовых параметров антенного элемента и субрешетки ГУРТ.

На основе полученных в результате моделирования данных о чувствительности, была выполнена оценка возможностей радиоастрономических наблюдений радиоисточников различных типов излучения. Проведено большое количество наблюдений, во время которых зафиксировано радиоизлучение Солнца (типов II, III, IIIb, IV, U, дрейфующая пара), Юпитера (L- и S-всплески), галактического фона и пульсаров.

Впервые с помощью антенной решетки, которая состоит из 25 активных антенн зарегистрировано радиоизлучение 16 пульсаров в диапазоне частот 30-70 МГц. Проведена серия одновременных совместных наблюдений пульсаров в сверхшироком диапазоне частот с помощью радиотелескопа УТР-2 и субрешеток радиотелескопа ГУРТ. Определены плотности потоков радиоизлучения пульсаров в данном диапазоне, а также, меры дисперсии каждого пульсара.

Таким образом, исследовано континуальное, спорадическое и импульсное радиоизлучение объектов Вселенной с помощью малого низкочастотного радиотелескопа нового поколения.

Ключевые слова: Солнце, Юпитер, пульсары, радиоизлучение, радиотелескоп, активная антенна, антенная решетка, чувствительность, ГУРТ.

ABSTRACT

Yerin S. M. Low-frequency cosmic radio emission as an object of observations with wideband radio telescope of the new generation. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics, Speciality 01.03.02 – Astrophysics, radio astronomy. – Institute of Radio Astronomy of National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The thesis describes studies of continuum, sporadic and pulsed radio emissions of objects of the Universe in decameter and meter wave ranges using a small-sized low-frequency radio telescope of the new generation. As an example of such radio telescope, a 25-element GURT radio telescope subarray was chosen.

At first, the parameters of the phased antenna array element and the entire subarray were carefully modelled and analyzed. Mathematical models of the GURT active antenna element and the GURT subarray were developed. Using these models allowed obtaining antennas noise and power performances which are impossible to measure or such measurements require unreasonably expensive resources. The models, unlike existing ones, take into account all sources of external and internal noise, the effect of the near ground surface, and the mutual coupling of the array elements. The models are based on the matrix theory of antenna arrays, the theory of noisy multiports and use the results of antenna computer simulations with software based on the method of moments. The results of modelling include frequency dependences of effective area, system sensitivity in terms of system equivalent flux density and sky noise dominance, the contribution of noise temperatures from various noise sources to the output signal in a wide frequency range, and for various main beam directions of the subarray. The adequacy of the developed mathematical models is confirmed with a comparison of modelling results and results of

real active antenna and GURT subarray noise parameters measurements. The results of modelling prove that the developed subarray ensures the sky noise dominance of 6-10 dB for all beams, that completely satisfies the requirements for its application for radio astronomy observations and astrophysical studies.

On the basis of sensitivity modelling results, there were estimated possibilities of radio astronomy observations of various types of emissions from cosmic radio sources. Many various observations with the GURT subarray and the single active antenna were carried out, which allowed registering active Sun (types II, III, IIIb, IV, U, drifting pairs), Jupiter (L- and S-bursts), galactic background and pulsar radio emissions in ultra-wide frequency range. Long-term observations of sky background noise have shown the high stability of the GURT subarray parameters. The observations of the active Sun made it possible to find features of sporadic solar radio emission that allow estimating parameters of the solar corona, acquiring statistics of solar drift pair bursts occurrence, as well as proving a good perspective of small-sized radio telescopes of new generation using for various studies. Such small instruments show their potential for long-term monitoring and gathering statistics of emission types occurrence. Jupiter's decameter radio emission observations with GURT subarray were carried out in the frame of Juno space mission ground support. The S- and L-bursts were registered with the time resolution down to 10 ms. The observations of strongly polarized Jovian radio emission have shown the possibilities of polarized cosmic radio emission studies using the GURT active antenna subarray of two orthogonal linear polarizations.

A survey of the strongest and nearest to the Earth pulsars was carried out with the GURT subarray. For the first time, the radio emission of 16 pulsars in the frequency range 30-70 MHz was registered using an antenna array of only 25 active antennas with integration time from 1 to 4 hours. A series of joint simultaneous pulsar observations in ultra-wide frequency range using UTR-2 radio telescope and GURT subarrays was carried out. Pulsar radio emission power flux densities and dispersion measures were determined for each pulsar. An observation technique for detecting the impact of ionospheric refraction on the pulsar flux density estimation was suggested and tested. The technique uses high flexibility of UTR-2 radio telescope and location of UTR-2 and GURT radio telescopes on the same observatory site. Two weekly observation sessions for pulsars B1133+16, B1508+55, and B1919+21 were carried out in order to register the variability of their flux densities and dispersion measures. The results have shown high variability of average visible pulsar flux density from day to day and stability of dispersion measure value during two weeks of observations with the accuracy of 0.006 pc/cm^3 .

Continuum, sporadic, and pulsed radio emissions of objects of the Universe were studied using small low-frequency radio telescope of new generation.

Key words: Sun, Jupiter, pulsars, radio emission, radio telescopes, active antenna, antenna array, sensitivity, GURT.

Підписано до друку 21.08.2020 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк-цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 2108202001

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літера Б-1
Тел. +38-067-91-93-922
www.modelist.in.ua