

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.143>
УДК 520.27: 523.4

В.В. Захаренко, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9977-824X>
О.О. Коноваленко, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1949-9625>
П.Л. Токарський, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5112-7744>
О.М. Ульянов, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0934-0952>
І.М. Бубнов, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8396-1434>
О.М. Резніченко, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7308-4491>
С.М. Єрін, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6978-5956>
О.Д. Христенко, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5720-2300>
Радіоастрономічний інститут НАН України
(ROR: <https://ror.org/020bzqr95>), Харків, Україна
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

ЗАСАДИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ РАДІОТЕЛЕСКОПА УТР-2

Предмет і мета роботи. Відновлення роботи найбільшого у світі декаметрового радіотелескопа УТР-2 після руйнувань, спричинених вторгненням агресора, потребує залучення значних зусиль, фінансових та організаційних ресурсів. З огляду на це доцільно водночас з ремонтом пошкоджених систем провести модернізацію інструмента, що сприятиме істотному розширенню його функціональності і підвищенню ефективності застосування. Метою статті є ознайомлення наукової спільноти з основними принципами модернізації радіотелескопа та пов'язаними з нею перспективами суттєвого зростання рівня інформативності майбутніх радіоастрономічних досліджень з його застосуванням.

Методи та методологія. На основі більше ніж півстолітнього досвіду розроблення та експлуатації унікального радіоастрономічного обладнання — від антен до засобів обробки — проаналізовано можливості поліпшення параметрів радіотелескопа та підходи до його масштабної модернізації. Використання розроблених у Радіоастрономічному інституті НАН України науково-технічних рішень дозволяє розширити поле зору радіотелескопа, збільшити кількість одночасно використовуваних променів, розширити робочий діапазон як у бік низьких, так і у бік високих частот.

Результати. Розроблено засади модернізації УТР-2 з гібридною системою фазування. Запропоновано поділити існуючі антенні решітки радіотелескопа на 68 субсекцій по 30 антенних елементів, усередині яких здійснюватиметься аналогове фазування, а між субсекціями — цифрове. Це дозволить більш ефективно використовувати антенне поле і надасть можливість задіяти до 1000 променів радіотелескопа одночасно для картографування небесної сфери. Заплановано збільшити робочий діапазон частот радіотелескопа з 8...33 до 5...40 МГц.

Висновок. Модернізація радіотелескопа дозволить відкрити нові можливості радіоастрономічних спостережень та забезпечити суттєве зростання інформативності радіоастрономічних досліджень. Система гібридного фазування значно спрощує долучення УТР-2 до мережі європейських низькочастотних радіотелескопів.

Ключові слова: радіотелескоп, фазообертач, підсилювач, фільтр, аналого-цифровий перетворювач, система фазування.

Цитування: Захаренко В.В., Коноваленко О.О., Токарський П.Л., Ульянов О.М., Бубнов І.М., Резніченко О.М., Єрін С.М., Христенко О.Д. Засади відновлення та модернізації радіотелескопа УТР-2. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 3. С. 143—153. <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.143>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

Вступ

Радіотелескоп декаметрового діапазону УТР-2 [1], який досі має найбільшу у світі ефективну площу, випередив свій час, а його розробники на чолі з одним із піонерів світової радіоастрономії С.Я. Брауде втілили в його конструкції низку наукових та технічних рішень, які актуальні і після півстолітньої успішної роботи телескопа та є частиною розробок інструментів нового покоління. Т-подібна структура, ширококутовість, заповнена апертура, електронне керування променем, багатопроменевість та інші структурні й конструктивні особливості дозволили йому ефективно працювати як в автономному режимі, так і в якості центрального елемента найбільшого у світі декаметрового інтерферометра УРАН, що дало змогу отримати видатні наукові результати. Серед них варто згадати створення каталогу радіоджерел та карти неба в декаметровому діапазоні, відкриття радіорекомбінаційних ліній вуглецю зі значенням головного квантового числа більше 1000, перше детектування пульсарів у декаметровому діапазоні та відкриття декаметрового випромінювання більше 60 пульсарів, наземне детектування блискавок в атмосфері Сатурна, важливі результати в дослідженнях Сонця, Юпітера. Багато важливих результатів було досягнуто при дослідженні мерехтінь радіоджерел, імпульсного, спорадичного та транзієнтного випромінювання космічних об'єктів. Зважаючи на це, УТР-2 був включений у найширше коло міжнародних наукових проєктів, серед яких можна згадати багаточастотне вивчення радіовипромінювання пульсарів, багатоантенне дослідження Сонця, наземну підтримку космічних місій — Cassini, Juno, WIND, STEREO, Packer Solar Probe, Solar Orbiter тощо.

Навіть такий стислий перелік наукових досягнень доводить, що цінність радіотелескопа УТР-2 для сучасної науки неможливо переоцінити. Він є науковим надбанням не тільки України, а і всього людства. Припинення роботи цього інструмента, пов'язане з агресією РФ, відкинула багато наукових програм на десятиліття назад. Радіоастрономічна обсерваторія ім. С.Я. Брауде перебувала під окупацією з початку широкомасштабного вторгнення країни-агресора у лютому до вересня 2022 року. Головна будівля обсерваторії була

частково зруйнована. Суттєво постраждали система керування та система фазування через пошкодження радіочастотних кабелів, які складали важливу її частину. Для збереження та розвитку наукового потенціалу України існує нагальна необхідність відновлення роботи УТР-2. Потрібна розробка проєкту та його реалізація з урахуванням сучасних досягнень наукового і технічного прогресу та включення оновленого УТР-2 до Європейської радіоастрономічної мережі.

1. Структура та характеристики радіотелескопа УТР-2

Наведемо стислий огляд структури та головних характеристик [2–4] існуючої версії радіотелескопа. Антенна система УТР-2 має Т-подібну конфігурацію (рис. 1, а), що складається з трьох плечей — північного, південного і західного. Кожне з них має довжину 900 м і являє собою фазовану антенну решітку (ФАР). Північне і південне плечі, що подовжують одне одного, орієнтовані вздовж географічного меридіану, а західне плече — вздовж паралелі. Фазовані антенні решітки північного і південного плечей є ідентичними, кожна з них складається з 720 елементів (120 рядів по 6 елементів); ФАР західного плеча містить 600 елементів (100 рядів по 6 елементів). Елементами ФАР є ширококутові шунтові симетричні диполі циліндричної форми (рис. 1, б) довжиною 8 м, що розташовані на висоті 3.5 м над ґрунтом. Осі всіх диполів орієнтовані вздовж паралелі. Відстань між сусідніми елементами решіток в напрямку меридіану становить 7.5 м, а в напрямку паралелі — 9 м.

Заради зручності керування ФАР її плечі розбито на 12 секцій — по чотири в кожному плечі (рис. 1). Кожна з секцій північного і південного плечей містить в собі 120 диполів, а західного — 100 диполів. Система фазування всієї ФАР створена із застосуванням принципу часової затримки сигналу з дискретним способом керування променем. Оскільки затримка сигналу визначається часовим інтервалом, упродовж якого електромагнітна хвиля долає певну ділянку кабелю, то змінюючи довжину цієї ділянки можна керувати часом затримки сигналу. Зазначений принцип фазування реалізовано в УТР-2 за допомогою багатоповерхової кабельної схеми збирання

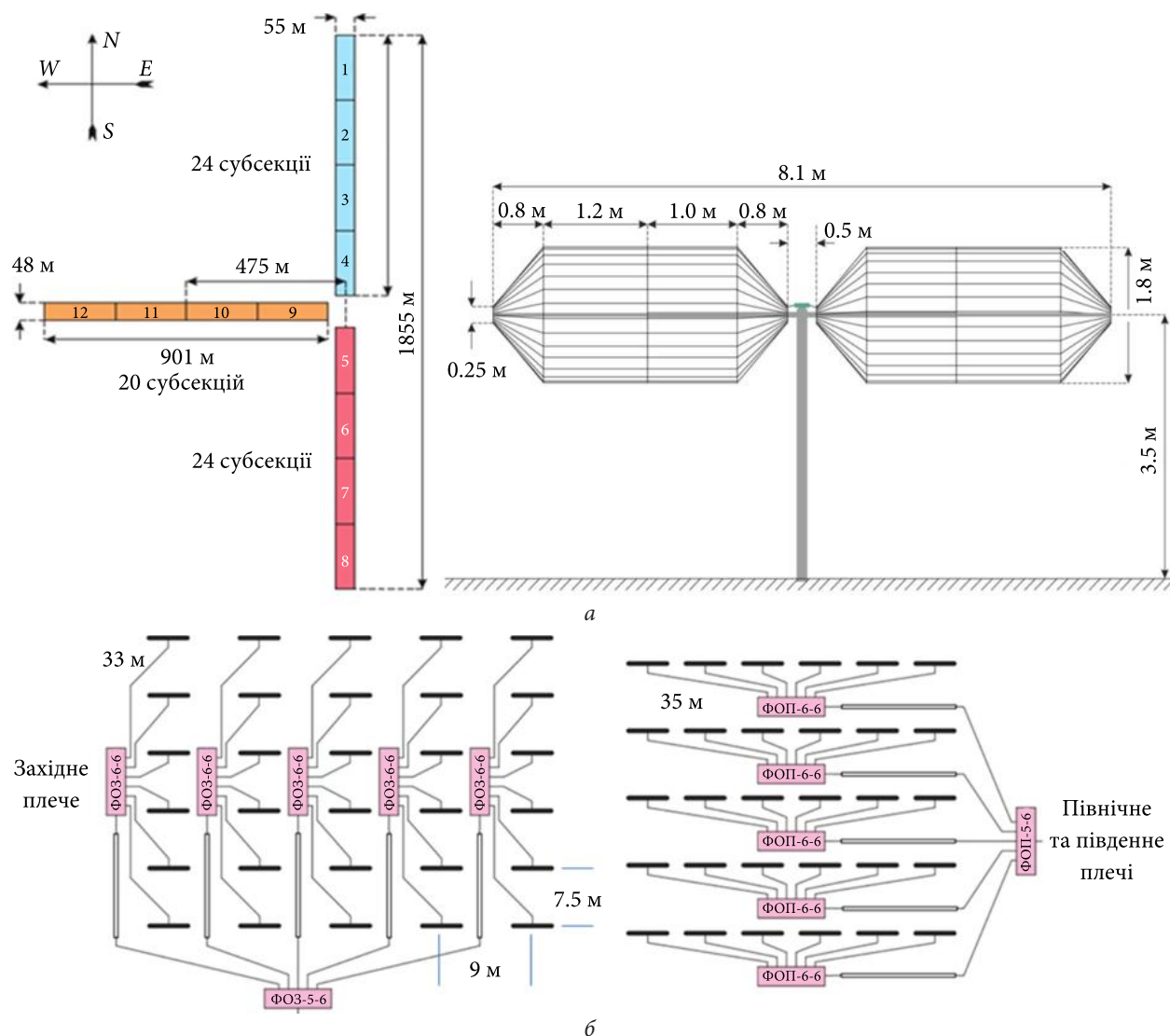


Рис. 1. Геометрія антенної решітки радіотелескопа УТР-2 з поділом на секції (а), антенний елемент УТР-2 (б) та запропоновані 30-елементні секції західного, північного та південного плечей антени (в)

сигналу, де кожний поверх містить фазообертачі, здатні змінювати часову затримку сигналу на його шляху від диполя до приймача.

Така структура дозволила досягти УТР-2 високих показників якості, зокрема рекордної ефективної площі, високої роздільної здатності, можливості одночасного створення п'яти вузьких променів, високої точності їх наведення на джерело випромінювання і високої швидкості керування напрямком приймання сигналів, що доведено півстолітньою історією його безперервної експлуатації.

Проте за сьогоднішніми мірками він має низку недоліків. Система фазування, побудована з використанням багатокілометрової мережі

ВЧ-кабелів, морально і фізично застаріла; використані у фазообертачах реле виявилися ненадійними через їхню чутливість до стану навколишнього середовища, через що для підтримки їх працездатності потрібно було вживати певні технічні заходи; п'ятипроменевий режим роботи вже не завжди задовольняє вимогам сучасних радіоастрономічних досліджень.

Таким чином, виникла нагальна потреба не тільки усунути пошкодження радіотелескопа, що спричинені його руйнуваннями під час окупації, але й осучаснити його структуру, елементну базу і систему приймання та оброблення сигналів шляхом упровадження новітніх досягнень у галузях електроніки і цифрової техніки.

2. Основні вимоги та параметри модернізації радіотелескопа

Незважаючи на рекордну ефективну площу, широкосмуговість антенних елементів та багатопроменеву діаграму направленості (ДН) радіотелескопа, які було реалізовано на початку 70-х років минулого століття, розвиток науки, електронної та комп'ютерної техніки впродовж десяти років дає змогу суттєво поліпшити основні параметри інструмента.

Основні принципи модернізації радіотелескопа УТР-2, спрямовані на збереження і розвиток його унікальних властивостей за допомогою новітніх технологій, можна сформулювати у такому вигляді.

1. Збереження рекордної ефективної площі УТР-2, яка в центрі частотного діапазону сягає $150\,000\text{ м}^2$, та Т-подібної структури, що чудово себе зарекомендувала на практиці. Тобто змін в розташуванні всіх 2040 антенних елементів (АЕ) не планується. Рішення зберегти Т-подібну структуру з щільним заповненням антени є важливим та обґрунтованим.

2. Розширення частотного діапазону, яке надає можливості для дослідження космологічних ефектів (зокрема, пошуку червонозміщеної лінії нейтрального водню епохи Темних віків), вивчення випромінювання галактичних джерел та планет Сонячної системи. Антенний елемент (диполь), пристрої його узгодження з трактом та нові високолінійні широкосмугові підсилювачі, що розроблені в РІ НАНУ та успішно використовуються на всіх його обсерваторіях, витримали перевірку часом і дозволяють здійснити розширення робочої смуги частот УТР-2 від $8.25\ldots 33.0$ до $5\ldots 40$ МГц, отже теж не потребують змін.

3. Створення гібридної аналого-цифрової схеми фазування радіотелескопа. Це кардинально розширить миттєве поле зору, збільшить кількість променів та створить можливості для картографування — так званого «іміджингу» — побудови зображень певної ділянки небесної сфери. Планується, що структура системи фазування буде такою: усі 12 існуючих секцій антенної решітки радіотелескопа розділяються на субсекції з 30 антенних елементів у кожній, разом — 68 субсекцій. У середині секцій використовуватиметься

аналогова система фазування. Між секціями система фазування змінюється на цифрову.

Розташування всього обладнання в колекторах (тунелях) УТР-2 та у підвалі лабораторної будівлі обсерваторії забезпечує достатньо високий рівень температурної стабільності працюючих приладів, а герметичне виконання корпусів усіх елементів радіотракту (фазообертачів, підсилювачів тощо) має захистити їх від впливу вологи.

Розширення спектра робочих частот проведиметься як у бік високих, так і в бік низьких частот за рахунок нової аналогової та цифрової апаратури і модернізації антенних елементів, а також електродинамічного моделювання з урахуванням взаємних зв'язків у решітці та впливу реального ґрунту.

Розширенню смуги робочих частот сприятиме розроблена в РІ НАН України апаратура, зокрема новий швидкодіючий і багатифункціональний цифровий двоканальний приймач, який працює в діапазоні частот $0\ldots 40$ МГц, та нові підсилювачі з великим динамічним діапазоном та високою стабільністю амплітудних і фазових характеристик, практично нечутливі до змін температури навколишнього середовища.

Гібридний принцип фазування було розроблено в рамках проектування радіотелескопа ГУРТ¹ та повністю імплементовано й апробовано на радіотелескопі НенюФАР².

3. Гібридний принцип фазування. Вибір параметрів аналогової системи

Суть цього принципу полягає у тому, що антенні елементи в кожній секції решітки фазуються аналоговим способом з використанням кабельних (радіочастотних) ліній затримки, а фазування секцій між собою — на вищому етапі — здійснюється цифровим способом. Гібридний принцип

¹ Коноваленко О.О., Єрін С.М., Бубнов І.М. та ін. Астрофізичні дослідження за допомогою малорозмірних низькочастотних радіотелескопів нового покоління. 2016. *Радіофізика і радіоастрономія*. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083

² Zarka, P., Tagger, M., Denis, L., et al., 2015. NenuFAR: Instrument description and science case. In: *Proc. 2015 Int. Conf. Antenna Theory Tech.: Dedicated to 95 Year Jubilee of Prof. Y.S. Shifrin (ICATT 2015)*. 7136773. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773

фазування буде ефективним, якщо кількість елементів у секції буде невеликою і аналогова система фазування елементів у ній буде нескладною. Як приклади радіотелескопів, де свого часу було застосовано гібридну систему, наведемо ГУРТ і НенюФАР. Решітка радіотелескопа ГУРТ розбита на квадратні секції з 25 (5×5) антенних елементів, а в радіотелескопі НенюФАР одна секція складається з 19 елементів, розташованих у вузлах гексагональної сітки.

Для впровадження гібридної системи фазування у радіотелескопі УТР-2 варто змінити існуючу структуру поділу ФАР УТР-2 на 12 секцій, розділивши їх на субсекції з 30 елементами в кожній. У результаті північне і південне плечі складатимуться з 24-х субсекцій, а західне плече — з 20 субсекцій. Ці субсекції є невеликими за розміром (45×30 м між центрами крайніх диполів у північному та південному плечах або 36.0×37.5 м — у західному плечі УТР-2), тому забезпечать, з одного боку, широке поле зору радіотелескопа ($\lambda/D \sim 1$ на центральній частоті), а з іншого боку, послаблять вимоги до цифрової системи фазування щодо складності алгоритмів та дозволять зменшити час обробки більше ніж на порядок через необхідність обробляти 68 замість 2040 незалежних потоків даних. Крім того, завдяки цифровій системі фазування можна гнучко обирати кількість променів ДН радіотелескопа: від максимуму (кількасот променів) до двох (режим ON-OFF) чи навіть одного — залежно від програми спостережень.

Обрана система фазування має три характерні ДН: окремого АЕ, субсекції, повного радіотелескопа.

Типове співвідношення розмірів і форм ДН показане на рис. 2.

У модернізованій версії радіотелескопа планується використовувати практично повністю збережені кабелі підключення АЕ та з'єднання між фазообертачами (ФО) ФО-6-4 та ФО-5-5 УТР-2, де перша цифра означає кількість входів ФО, а друга — кількість бітів у двійковому коді керування положеннями променя. На рис. 2, б показане віяло нормованих ДН субсекції антенної решітки УТР-2 у площині «схід—захід», що створюється при послідовному перемиканні 4-розрядного ФО-4-4. Варіації обвідної цього віяла ДН призводять до коливань рівня прийнятого

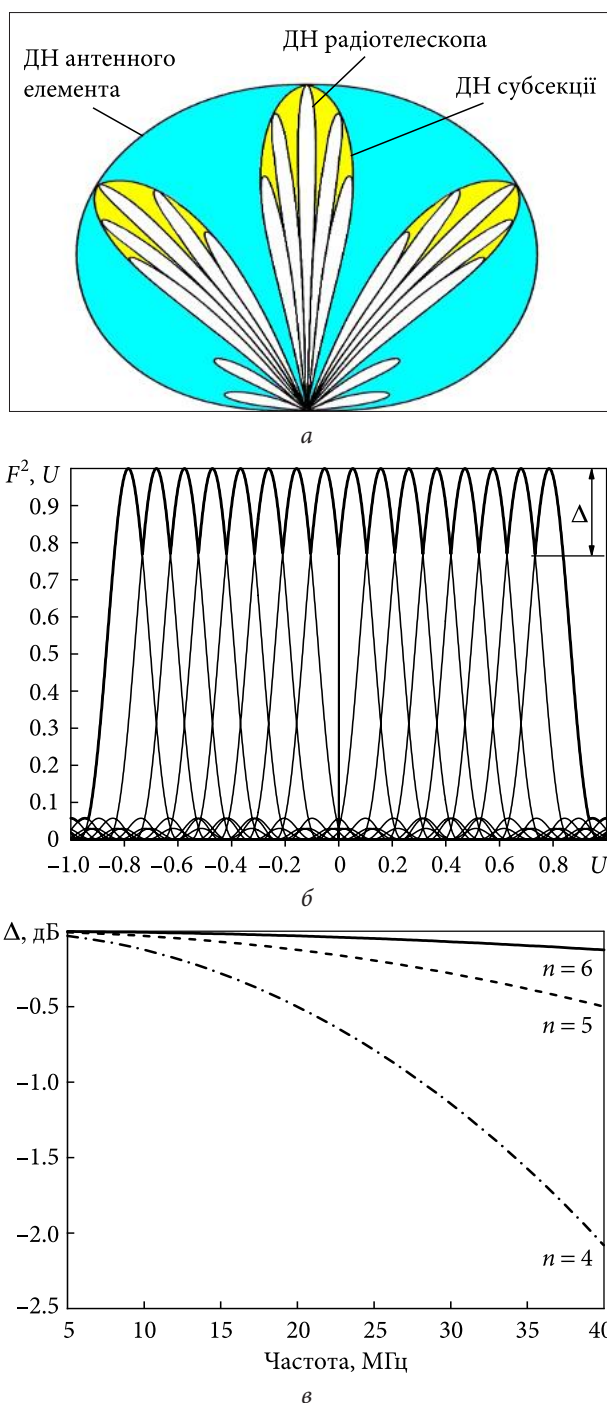


Рис. 2. Приклад співвідношення ДН окремого АЕ, субсекції та повного радіотелескопа для гібридної системи фазування (а); віяло нормованих ДН у площині субсекції з 4-розрядним ФО (б); частотна залежність перерізу ДН субсекції з 4-, 5- та 6-розрядними ФО (в)

сигналу під час стеження за джерелом випромінювання. Амплітуда згаданих варіацій визначається рівнем перерізу ДН Δ , який залежить від розрядності ФО n і частоти. На рис. 2, в показані

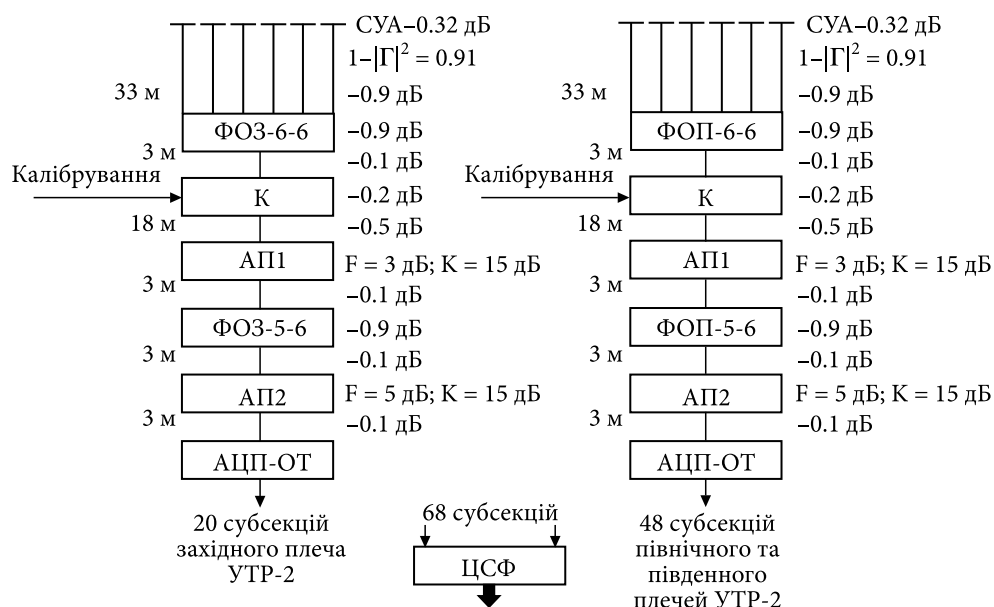


Рис. 3. Функціональна схема модернізованого ВЧ-тракту УТР-2: ліворуч — західне плече, праворуч — північне та південне плечі, унизу — цифрова система фазування. Втрати радіосигналу в кабелях та ФО наведені для частоти 25 МГц

частотні залежності Δ для 4-, 5- і 6-розрядних фазообертачів у діапазоні 5...40 МГц. Найбільші варіації Δ спостерігаються на частоті 40 МГц; вони становлять -2.1 , -0.5 і -0.12 дБ для $n = 4, 5$ і 6 , відповідно. Зважаючи на це, для керування напрямками променів у субсекціях пропонується обрати 6-розрядні ФО, які забезпечать рівномірний рух променя радіотелескопа у двох ортогональних напрямках.

4. Функціональна схема модернізованого радіотракту телескопа

Функціональну схему ВЧ-тракту західного, північного і південного плечей радіотелескопа зображено на рис. 3.

Для позначення складових частин модернізованого ВЧ-тракту радіотелескопа на рис. 3 застосовані такі скорочення: $S_{\Sigma A}$ — схема узгодження антенного елемента; ФОЗ-6-6 — ФО західного плеча на 6 входів і 2^6 положень променя; К — комутатор «антена—навантаження»; АП1 — антенний підсилювач 1-го ярусу; ФОЗ-5-6 — ФО західного плеча на 5 входів і 2^6 положень променя; АП2 — антенний підсилювач 2-го ярусу; АЦП-ОТ — аналого-цифровий перетворювач — оптотрансвер; ЦСФ — цифрова система фазування, яка призна-

чена для використання у всіх 68 субсекціях для формування потрібної кількості променів радіотелескопа.

У системі фазування субсекцій північного та південного плечей УТР-2 використовуються фазообертачі ФОП (П — «північ/південь») з таким самим функціональним навантаженням, змінними довжинами між антенними елементами та рядами: ФОП-6-6 — для 6 антенних елементів (2^6 положень променя) та ФОП-5-6 — для фазування 5 рядів і 2^6 положень променя.

5. Фазообертачі субсекцій

Принципову схему одного з фазообертачів (ФОП-5-6 — з 5-ма входами) наведено на рис. 4. Для можливості нахилу променя на 180° з обраним кроком за обома координатами U та V , а не тільки за координатою V (нахил з півдня на північ), як було зроблено в початковій схемі УТР-2, були розраховані довжини кабелів часової затримки (таблиці).

Задля визначеності: входи нумеруються з заходу на схід — для антенних елементів, з півдня на північ — для рядів. Затримки збільшуються для «далішніх» (відносно центра) пар елементів, що фазуються. Ці пари входів вказані в таблиці разом із номером лінії затримки. Фазообертачі ФОП-6-6

антенних елементів мають подібну структуру, де входи зібрані у такі пари: 1-6, 2-5 та 3-4.

В оригінальних фазообертачах УТР-2 використовувалися реле РЕС8, але заявлена в його паспорті герметичність не витримала перевірки часом. Тому у ФО, розроблених для нових радіотелескопів, застосовані герметичні реле (наприклад, реле Omron G6K-2F-RF). Оскільки ці ФО вже тривалий час успішно працюють у радіотелескопі ГУРТ, їх планується використати і в модернізованому варіанті УТР-2.

6. Антенні підсилювачі

Проектування системи підсилення радіотелескопа в низькочастотному радіодіапазоні, де фон Галактики та інші шуми є набагато вищими за внутрішні шуми підсилювачів, має, по-перше, бути націленим на досягнення максимального динамічного діапазону (ДД) на всіх частотах і, по-друге, мати достатньо малий шум-фактор. Для забезпечення максимального ДД системи аналого-цифровий перетворювач (АЦП) повинен мати розрядність не менше 16 бітів. Ефективне використання АЦП без зменшення ДД всієї системи потребує вирівнювання за допомогою додаткового еквалайзера спектра зовнішнього сигналу (від 5 до 40 МГц), де шуми Галактики змінюються більше ніж у 150 разів. Компенсація втрат сигналу в блоках, показаних на рис. 3, та підсилення рівня зовнішніх шумів до значення 3–4 бітів АЦП потребує близько 30 дБ сумарного підсилення. Проєкт модернізації УТР-2 передбачає розділення системи антенного підсилення на два яруси (рис. 5). Перший ярус має забезпечити малий власний шум, а другий — високий ДД.

Необхідною складовою частиною системи підсилення є фільтри. Найбільш важливим є антиалайзинговий фільтр (ААФ, anti-aliasing filter), який придушує частоти, вищі за половину частоти дискретизації, запобігаючи виникненню

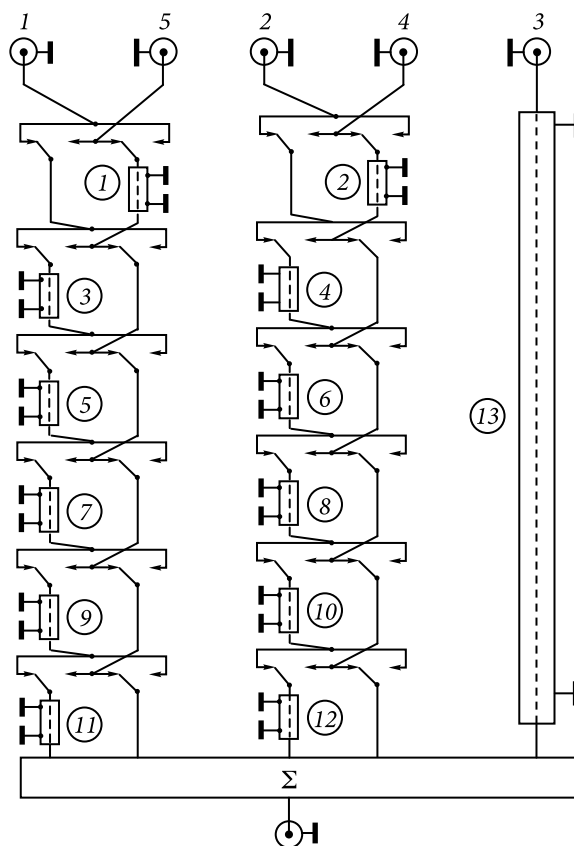


Рис. 4. Принципова схема фазообертача північного плеча антени ФОП-5-6. Нумери відрізків кабелів часової затримки, які відповідають таблиці, наведені в колах поблизу відповідних кабелів

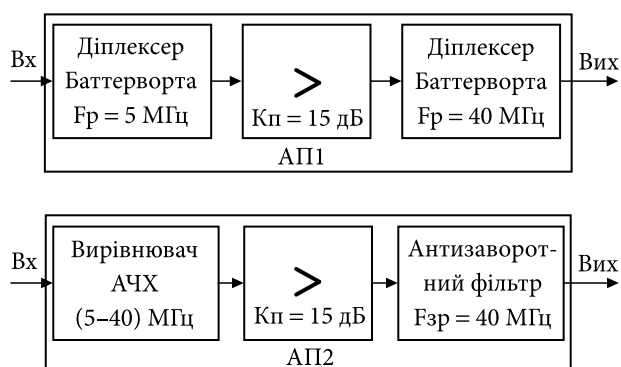


Рис. 5. Функціональні схеми антенних підсилювачів першого та другого ярусів модернізованого УТР-2

Довжина кабелів фазообертача ФОП-5-6 з урахуванням коефіцієнта вкорочення 1.51 (для кабелю з поліетиленовим діелектриком) електричної довжини ліній затримки модернізованого УТР-2

Розряд (номер на рис. 4)		1	2	3	4	5	6
Довжина кабелів L , м	Входи 1, 5	0.309 (1)	0.619 (3)	1.238 (5)	2.475 (7)	4.950 (9)	9.901 (11)
	Входи 2, 4	0.155 (2)	0.309 (4)	0.619 (6)	1.238 (8)	2.475 (10)	4.950 (12)
	Вхід 3	9.824 (13)					



Рис. 6. LOFAR-кабінет — цифровий блок фазування та збору інформації секції LOFAR

ефекту накладення (aliasing) спектрів різних зон Найквіста та появи артефактів при аналого-цифровому перетворенні.

Діплекси на вході та виході першого ярусу забезпечуватимуть мінімізацію коефіцієнта стоячої хвилі при виділенні робочого діапазону радіотелескопа. Розташування вирівнювача АЧХ перед входом підсилювача другого ярусу захищає його від перевантаження низькочастотними завадами та шумами. Антиалайзинговий фільтр розташований після буферного розв'язаного підсилювача перед АЦП. Ця частина схеми (від АП2 до АЦП) матиме малу електричну довжину порівняно з довжиною хвилі, що запобігатиме розвитку хвильових процесів (через неідеальне узгодження ААФ) та їх впливу на АЧХ системи.

7. АЦП та оптотрансивери. Цифрова система фазування. Приймачі

Винесення АЦП до виходів субсекцій та передача даних волоконно-оптичними лініями зв'язку (ВОЛЗ) має низку переваг: суттєве вкорочення радіочастотних кабелів, відсутність впливу радіозавад на ВОЛЗ (які наразі помітно дешевші за радіочастотні кабелі), більша стійкість до впливів негативних факторів навколишнього середовища, передача сигналів керування субсекцією без використання додаткових інформаційних ліній.

Крім того, цифрова система фазування, частиною якої можна вважати АЦП, використовує

цифрове вирівнювання затримок, яке значно точніше за аналогове і простіше для реалізації.

Проектом передбачається, що кінцевою частиною ЦСФ може бути система керування, подібна до LOFAR-кабінету (рис. 6), який успішно використовується у радіотелескопі LOFAR [5].

LOFAR-кабінет має два набори по 96 двоканальних входів для оцифровування та оброблення цифрової інформації від окремих субсекцій. Враховуючи, що в проекті модернізації УТР-2 передбачено створення тільки 68 субсекцій, то цифрових потужностей одного LOFAR-кабінету цілком вистачить не лише для УТР-2, а й для підключення додаткових секцій в майбутньому.

Для розв'язання значної кількості радіоастрономічних задач, де достатньо двопробеневого режиму роботи або режиму ON-OFF, функції реєстратора може ефективно виконувати цифровий приймач DSP-U (Digital Spectro-Polarimeter "Ukraine").

Наведемо технічні характеристики приймача-реєстратора DSP-U:

- діапазон робочих частот — $0 \dots 40$ МГц;
- кількість входних каналів — 2;
- максимальна кількість частотних каналів — 524 288;
- нижня межа роздільної здатності: за частотою — 76 Гц, за часом — 0.0128 мс;
- розрядність АЦП — 16 біт;
- динамічний діапазон — 90 дБ.

Цифровий приймач DSP-U складається з АЦП, FPGA (Field-Programmable Gate Array) та комп'ютера з графічним процесором і рейд-ма-

сивом жорстких дисків. Програма обробки забезпечує гнучкість у виборі кількості (ширини смуги) частотних каналів, які будуть використані в радіоастрономічних спостереженнях. Залежно від цього обробка сигналів у режимі реального часу (спектральні перетворення та розрахунок крос-спектра) покладаються або на FPGA (обсяг пакета даних — до 32k), або на графічний процесор.

Для передачі цифрових потоків у комп'ютер-реєстратор у приймачі застосований програмований USB 3.0 SuperSpeed контролер EZ-USB FX3, який працює на тактовій частоті до 100 МГц з 32-розрядною вхідною шиною та забезпечує максимальну швидкість інтерфейсу USB 3.0 до 3.2 Гбіт/сек, що достатньо для передачі необхідного потоку радіоастрономічних даних. Програма керування дозволяє реалізувати такі режими реєстрації:

- «форма хвилі» — режим «сирих» даних, що забезпечує оцифрування радіоастрономічних сигналів по одному або двох каналах і запис на диск для подальшої обробки зовнішніми програмами. Обсяг даних, що записуються на диск через два канали в цьому режимі, становить 1.2 ТБ на годину;

- «спектральний» — режим побудови динамічних спектрів потужності на основі фур'є-перетворення по обох каналах окремо та режими побудови динамічних спектрів спільно по двох каналах;

- «кореляційний» — режим обчислення комплексного динамічного крос-спектра між сигналами в обох каналах. Залежність фази такого крос-спектра від часу та частоти містить інформацію про напрям надходження сигналу та про його когерентні властивості.

Таким чином, приймач-реєстратор DSP-U може реєструвати будь-які типи радіоастрономічних сигналів і забезпечує діапазон робочих частот до 40 МГц.

8. Планування та реалізація

Зважаючи на наявний воєнний стан, виконання представленого проекту поділене на два етапи. На першому етапі заплановано розроблення та

виготовлення блоків фазообертачів, підсилювачів та блоків АЦП з оптотрансиверами в лабораторних умовах — це можна робити незалежно від стану радіотелескопа. На другому етапі, терміни якого залежать від умов роботи та безпеки на самій обсерваторії, передбачено установити виготовлене обладнання на телескоп. Щодо лабораторного корпусу радіотелескопа — ще у 2024 році було розроблено проект капітального ремонту як самої будівлі, так і всіх комунікацій, зокрема систем енергозабезпечення.

Висновки

Запропоновані засади модернізації радіотелескопа УТР-2 з системою гібридного фазування відкривають нові можливості радіоастрономічних спостережень — як автономних, так і у взаємодії з партнерами. Перевірені технічні рішення у частині побудови сучасної аналогової частини тракту радіотелескопа створюють надійну основу для вибору та адаптації програмно-апаратних рішень щодо розширення доступного поля зору, збільшення кількості одночасно діючих променів і картографування та побудови зображень. Описана структура значно спрощує приєднання УТР-2 (а в подальшому — й інструментів системи УРАН) до Європейської мережі низькочастотних радіотелескопів.

Важливою особливістю проекту є розширення робочого діапазону в низькочастотну і у високочастотну області — з 8...33 МГц до 5...40 МГц, що необхідно для проведення спостережень і отримання результатів розв'язання широкого кола радіоастрономічних і астрофізичних задач, від космології до досліджень випромінювання планет.

Описані дослідження виконано в рамках держбюджетних наукових-дослідних робіт на замовлення НАН України, МОН України, міжнародних грантів. У 2022—2026 роках виконувалися НДР «Огляд», «Мережа», «Радіус», конкурсні проекти «Сигнал», «Медіум» (НАН України), «Супернова» (Фонд фундаментальних досліджень МОН України), «Особливості та взаємодія явищ у сонячній короні та міжпланетному середовищі» (Міжнародний проект УНТЦ-6435).

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., 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., Griesmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. 2016. *Exp. Astron.* Vol. 42. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
2. Braude S.Y., Men A.V., Sodin L.G. *Decameter wave radio telescope UTR-2*. Antennas: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ., 1978. Iss. 26. P. 3–15.
3. Men A.V., Sodin L.G., Sharykin N.K., Braude Y.M., Melianovsky P.A., Inyutin G.A., Goncharov N.Y. *Design principles and characteristics of the UTR-2 radio telescope antennas*. Antennas: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ., 1978. Iss. 26. P. 15–57.
4. Braude S.Ya., Megn A.V. Radio Astronomy Researches in Ukraine in Decameter Wave Range. *Radio Phys. Radio Astron.* 1996. Vol. 1, Iss. 1. P. 9–24.
5. Van Haarlem M.P., Wise M.W., Gunst A.W., Heald G., McKean J.P., Hessels J.W.T., de Bruyn A.G., Nijboer R., Swinbank J., Fallows R., Brentjens M., Nelles A., Beck R., Falcke H., Fender R., Hörandel J., Koopmans L.V.E., Mann G., Miley G., Röttgering H., Stappers B.W., Wijers R.A.M.J., Zaroubi S., van den Akker M., Alexov A., Anderson J., Anderson K., van Ardenne A., Arts M., Asgekar A., Avruch I.M., Batejat F., Bähren L., Bell M.E., Bell M.R., van Bemmell I., Bannema P., Bentum M.J., Bernardi G., Best P., Birzan L., Bonafede A., Boonstra A.-J., Braun R., Bregman J., Breitling F., van de Brink R.H., Broderick J., Broekema P.C., Brouw W.N., Brüggem M., Butcher H.R., van Cappellen W., Ciardi B., Coenen T., Conway J., Coolen A., Corstanje A., Damstra S., Davies O., Deller A.T., Dettmar R.-J., van Diepen G., Dijkstra K., Donker P., Doorduin A., Dromer J., Drost M., van Duin A., Eislöffel J., van Enst J., Ferrari C., Frieswijk W., Gankema H., Garrett M.A., de Gasperin F., Gerbers M., de Geus E., Griesmeier J.-M., Grit T., Gruppen P., Hamaker J.P., Hassall T., Hoeft M., Holties H.A., Horneffer A., van der Horst A., van Houwelingen A., Huijgen A., Iacobelli M., Intema H., Jackson N., Jelic V., de Jong A., Juette E., Kant D., Karastergiou A., Koers A., Kollen H., Kondratiev V.I., Kooistra E., Koopman Y., Koster A., Kuniyoshi M., Kramer M., Kuper G., Lambropoulos P., Law C., van Leeuwen J., Lemaitre J., Loose M., Maat P., Macario G., Markoff S., Masters J., McFadden R.A., McKay-Bukowski D., Meijering H., Meulman H., Mevius M., Middelberg E., Millenaar R., Miller-Jones J.C.A., Mohan R.N., Mol J.D., Morawietz J., Morganti R., Mulcahy D.D., Mulder E., Munk H., Nieuwenhuis L., van Nieuwpoort R., Noordam J.E., Norden M., Noutsos A., Offringa A.R., Olofsson H., Omar A., Orrú E., Overeem R., Paas H., PandeyPommier M., Pandey V.N., Pizzo R., Polatidis A., Rafferty D., Rawlings S., Reich W., de Reijer J.-P., Reitsma J., Renting G.A., Riemers P., Rol E., Romein J.W., Roosjen J., Ruiter M., Scaife A., van der Schaaf K., Scheers B., Schellart P., Schoenmakers A., Schoonderbeek G., Serylak M., Shulevski A., Sluman J., Smirnov O., Sobey C., Spreuw H., Steinmetz M., Sterks C.G.M., Stiepel H.-J., Stuurwold K., Tagger M., Tang Y., Tasse C., Thomas I., Thoudam S., Toribio M.C., van der Tol B., Usov O., van Veelen M., van der Veen A.-J., ter Veen S., Verbiest J.P.W., Vermeulen R., Vermaas N., Vocks C., Vogt C., de Vos M., van der Wal E., van Weeren R., Weggemans H., Weltevrede P., White S., Wijnholds S.J., Wilhelmsson T., Wucknitz O., Yatawatta S., Zarka P., Zensus A., and van Zwieten J. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.* 2013. Vol. 556. id. A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873

Стаття надійшла 25.06.2026

REFERENCES

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., 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., Griesmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.*, **42**, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
2. Braude, S.Y., Men, A.V., Sodin, L.G., 1978. *Decameter wave radio telescope UTR-2*. Antennas: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 3–15.
3. Men, A.V., Sodin, L.G., Sharykin, N.K., Braude, Y.M., Melianovsky, P.A., Inyutin, G.A., Goncharov, N.Y., 1978. *Design principles and characteristics of the UTR-2 radio telescope antennas*. Antennas: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 15–57.

4. Braude, S.Ya., Megn, A.V., 1996. Radio Astronomy Researches in Ukraine in Decameter Wave Range. *Radio Phys. Radio Astron.*, 1(1), pp. 9–24.
5. Van Haarlem, M.P., Wise, M.W., Gunst, A.W., Heald, G., McKean, J.P., Hessels, J.W.T., de Bruyn, A.G., Nijboer, R., Swinbank, J., Fallows, R., Brentjens, M., Nelles, A., Beck, R., Falcke, H., Fender, R., Hörandel, J., Koopmans, L.V.E., Mann, G., Miley, G., Röttgering, H., Stappers, B.W., Wijers, R.A.M.J., Zaroubi, S., van den Akker, M., Alexov, A., Anderson, J., Anderson, K., van Ardenne, A., Arts, M., Asgekar, A., Avruch, I.M., Batejat, F., Bähren, L., Bell, M.E., Bell, M.R., van Bemmell, I., Benne-
ma, P., Bentum, M.J., Bernardi, G., Best, P., Birzan, L., Bonafede, A., Boonstra, A.-J., Braun, R., Bregman, J., Breitling, F., van de Brink, R.H., Broderick, J., Broekema, P.C., Brouw, W.N., Brüggen, M., Butcher, H.R., van Cappellen, W., Ciardi, B., Coenen, T., Conway, J., Coolen, A., Corstanje, A., Damstra, S., Davies, O., Deller, A.T., Dettmar, R.-J., van Diepen, G., Dijkstra, K., Donker, P., Doorduyn, A., Dromer, J., Drost, M., van Duin, A., Eislöffel, J., van Enst, J., Ferrari, C., Frieswijk, W., Gankema, H., Garrett, M.A., de Gasperin, F., Gerbers, M., de Geus, E., Griesmeier, J.-M., Grit, T., Gruppen, P., Hamaker, J.P., Hassall, T., Hoeft, M., Holties, H.A., Horneffer, A., van der Horst, A., van Houwelingen, A., Huijgen, A., Iacobe-
lli, M., Intema, H., Jackson, N., Jelic, V., de Jong, A., Juette, E., Kant, D., Karastergiou, A., Koers, A., Kollen, H., Kondratiev, V.I., Kooistra, E., Koopman, Y., Koster, A., Kuniyoshi, M., Kramer, M., Kuper, G., Lambropoulos, P., Law, C., van Leeuwen, J., Lemaitre, J., Loose, M., Maat, P., Macario, G., Markoff, S., Masters, J., McFadden, R.A., McKay-Bukow-
ski, D., Meijering, H., Meulman, H., Mevius, M., Middelberg, E., Millenaar, R., Miller-Jones, J.C.A., Mohan, R.N., Mol, J.D., Morawietz, J., Morganti, R., Mulcahy, D.D., Mulder, E., Munk, H., Nieuwenhuis, L., van Nieuwpoort, R., Noordam, J.E., Norden, M., Noutsos, A., Offringa, A.R., Olofsson, H., Omar, A., Orrú, E., Overeem, R., Paas, H., PandeyPommier, M., Pandey, V.N., Pizzo, R., Polatidis, A., Rafferty, D., Rawlings, S., Reich, W., de Reijer, J.-P., Reitsma, J., Renting, G.A., Riemersv, P., Rol, E., Romein, J.W., Roosjen, J., Ruiter, M., Scaife, A., van der Schaaf, K., Scheers, B., Schellartv, P., Schoenmakers, A., Schoonderbeek, G., Serylak, M., Shulevski, A., Sluman, J., Smirnov, O., Sobey, C., Spreeuw, H., Steinmetz, M., Sterks, C.G. M., Stiepel, H.-J., Stuurwold, K., Tagger, M., Tang, Y., Tasse, C., Thomas, I., Thoudam, S., Toribio, M.C., van der Tol, B., Usov, O., van Veelen, M., van der Veen, A.-J., ter Veen, S., Verbiest, J.P.W., Vermeulen, R., Vermaas, N., Vocks, C., Vogt, C., de Vos, M., van der Wal, E., van Weeren, R., Weggemans, H., Weltevrede, P., White, S., Wijnholds, S.J., Wilhelmsson, T., Wucknitz, O., Yatawatta, S., Zarka, P., Zensus, A., and van Zwieten, J., 2013. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.*, 556, id. A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873

Received 25.06.2026

V.V. Zakharenko, O.O. Konovalenko, P.L. Tokarsky, O.M. Ulyanov,
I.M. Bubnov, O.M. Reznichenko, S.M. Yerin, O.D. Khrystenko
Institute of Radio Astronomy NAS of Ukraine
(ROR: <https://ror.org/020bzqr95>), Kharkiv, Ukraine

PRINCIPLES OF RESTORATION AND MODERNIZATION OF THE RADIO TELESCOPE UTR-2

Subject and Purpose. Restoring the world-largest decameter-wavelength radio telescope UTR-2 after the destruction inflicted by the full-scale Russian invasion requires significant efforts for mobilizing financial and organizational resources. In view of this, it is advisable to simultaneously repair the damaged systems and effectuate modernization of the instrument, which should significantly expand its functionality and increase the efficiency of its use. The present work is aimed at familiarizing the scientific community with basic principles underlying modernization of the UTR-2 radio telescope, and with the related expectations as to a significant increase in the information content of the future radio astronomical research projects performed with the facility.

Methods and Methodology. Resorting to the expertise gained through half a century work on developing and operating unique radio astronomical equipment (ranging from antennas to data processing complexes) we are able to analyze possibilities for improving parameters of the radio telescope, as well as techniques of its large-scale modernization. The scientific approaches and technical solutions developed at the Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine allow expanding the field of view of the radio telescope, increasing the number of pattern beams usable simultaneously, and expanding the operating range towards both lower and higher frequencies.

Results. Basic technical solutions have been suggested for modernizing the UTR-2 radio telescope through implementation of a hybrid phasing system for its antenna array. It has been decided to divide the existing array into 68 subsections, with each involving 30 elemental antennas inside. These are phased in an analog way, while phasing between the subsections is performed digitally, which should permit a more efficient use of the entire antenna field. Accordingly, it should be possible to simultaneously use up to 1000 antenna beams of the radio telescope for mapping the celestial sphere. Also, it is planned to increase the operating frequency range of the radio telescope from 8...33 MHz to 5...40 MHz.

Conclusion. The modernization of the radio telescope UTR-2 opens up new opportunities for radio astronomical observations, ensuring a significant increase in the informative capacity of the radio astronomical research. The novel hybridized phasing system is beneficial for inclusion of the UTR-2 in the network of European low-frequency radio telescopes.

Keywords: radio telescope, phase shifter, filter, analog-to-digital converter, phasing system.