

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.03.197>

УДК 520.272.2, 621.396.674

І. М. БУБНОВ, О. О. КОНОВАЛЕНКО, П. Л. ТОКАРСЬКИЙ,
О. М. КОРОЛЬОВ, С. М. ЄРІН, Л. О. СТАНИСЛАВСЬКИЙ

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: igor.bubnov@rian.kharkov.ua

СТВОРЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЧНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ ВСЕСВІТУ ЗІ ЗВОРОТНОГО БОКУ МІСЯЦЯ

Предмет і мета роботи: Теоретичні та експериментальні дослідження активної антени – елемента антенної решітки низькочастотного радіотелескопа для майбутньої обсерваторії на зворотному боці Місяця.

Методи і методологія: Для дослідження активної антени, що складається з диполя складної форми і малошумного підсилювача, використано її математичну модель у вигляді чотириполюсника, електричні параметри якого задаються матрицею розсіяння, а шумові – коваріаційною матрицею спектральних густин шумових хвиль. Така модель дозволяє виконувати коректний аналіз співвідношення сигнал/шум на виході активної антени з урахуванням зовнішніх і внутрішніх джерел шуму. Результати моделювання співставлено з результатами експериментальних вимірювань характеристик антени. За допомогою розробленої активної антени проведено радіоастрономічні спостереження в земних умовах.

Результати: Виконано числовий аналіз характеристик активної антени радіотелескопа в широкому діапазоні частот $4 \div 40$ МГц. Розроблено два варіанти малошумних підсилювачів, призначених для роботи в складі активної антени у земних та космічних умовах. У земних умовах експериментально доведено, що обсяг завдань, які ефективно можуть розв'язувати такі радіотелескопи на дуже низьких частотах, є досить широким – від досліджень Сонця до пошуку космологічних ефектів.

Висновки: Отримані в роботі результати розрахунків і натурних вимірювань показали задовільний збіг у більшій частині робочого діапазону частот. Результати цієї роботи можуть бути корисними у розробці та дослідженнях активних антен, призначених для роботи в декаметровому і гектометровому діапазонах хвиль, зокрема тих, що плануються використовувати в умовах космосу.

Ключові слова: активна антена, Місяць, радіоастрономічні спостереження, чутливість

1. Вступ

Україна має досить вагомий науково-технічний досвід для підготовки космічної місії до Місяця, а також її оснащення приладами для наукових досліджень як самого Місяця, так і дальнього космосу з його поверхні. Така космічна місія потребує значних витрат, але її реалізація цілком можлива у співпраці з іншими зацікавленими країнами. Незважаючи на значну складність і високу вартість досліджень на поверхні Місяця, науковий світ дуже зацікавлений у їх виконанні. Результати останніх роботизованих місій на Місяць (Lunar Reconnaissance Orbiter, Chandrayaan-1, ChangE-1 та інші) надихають на нові досягнення. Свою місячну програму запропонували і українсь-

кі вчені [1, 2]. Ця місія тривалістю щонайменше один рік має своєю метою вивчення Місяця та навколomisячного простору, а також встановлення на Місяці і використання низькочастотного радіотелескопа для проведення унікальних спостережень об'єктів Сонячної системи та інших джерел радіовипромінювання у Всесвіті. Планується, що така місія буде складатися з двох модулів – орбітального та посадкового, які можуть бути запущені разом одним носієм.

Місце розташування посадкового модуля обрано на зворотному (невидимому з Землі) боці Місяця неподалік від південного полюса. Основним його корисним навантаженням будуть антена та приймальна система радіотелескопа, обладнання для вимірювання характеристик плазми на

поверхні Місяця, а також панорамні камери для виявлення та спостереження хмар левітуючого пилу.

Орбітальний модуль буде працювати як ретранслятор, здійснюючи обмін даними між посадковим модулем і центром керування на Землі. Він буде перебувати на навколomisячній еліптичній орбіті, апоцентр якої має бути розташованим над південним полюсом, тобто над місцем розташування посадкового модуля, що забезпечить максимальну добову тривалість сеансів зв'язку.

Низькочастотні радіоастрономічні дослідження зі зворотного боку Місяця мають декілька важливих переваг порівнянно з наземними спостереженнями. По-перше, це відсутність впливу іоносфери Землі на поширення хвиль від космічних радіоджерел, що дозволяє проводити спостереження на частотах, нижчих за частоту іоносферної відсічки, яка для земної іоносфери становить $8 \div 12$ МГц. По-друге, на зворотному боці Місяця рівень завад набагато менший, ніж на Землі, оскільки шкідливе земне радіовипромінювання туди не потрапляє. Дослідження космічного радіовипромінювання на частотах нижчих за 10 МГц викликає великий інтерес у науковій спільноті [3–5] через можливість отримання додаткової інформації про корональні викиди мас на Сонці, сонячні радіосплески, радіовипромінювання планет, екзопланет, пульсарів, залишків наднових, а також інших радіоджерел Всесвіту. Стационарний радіотелескоп, споруджений на зворотному боці Місяця, дозволить проводити якісні спостереження у смузі частот $4 \div 40$ МГц, де чутливість бортових радіоастрономічних інструментів космічних апаратів є досить обмеженою. Великий потенціал цієї смуги частот для радіоастрономічних спостережень вже продемонстровано дослідженнями спорадичного радіовипромінювання активного Сонця, виконаними у роботі [6]. Використання місячного радіотелескопа разом з наземними інструментами суміжних діапазонів хвиль, такими як УТР-2, УРАН, ГУРТ [7] та іншими, дозволить одночасно спостерігати випромінювання у надширокому діапазоні частот, що є критично важливим для розв'язання багатьох задач радіоастрономії. Аналіз даних цих спостережень разом з результатами, отриманими інструментами у інших діа-

пазонах електромагнітного спектру, надає великі перспективи повнішого вивчення фізичних процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Першим етапом проектування радіотелескопа космічного базування є розробка його антенної системи, тому що зазвичай саме ця система має найбільші габарити та масу, а також визначає максимально можливу чутливість радіотелескопа. На частотах нижче 100 МГц найкращим варіантом його антенної системи є фазована антенна решітка. Чутливість антенної решітки забезпечується в першу чергу чутливістю її елементів. Метою даної роботи є розробка чутливої активної антени, прототипу елемента фазованої антенної решітки низькочастотного радіотелескопа, що працюватиме в кліматичних умовах місячної поверхні.

2. Конструкція активної антени

Результати багаторічної роботи з дослідження та виготовлення низькочастотних активних антен [8–11] у Радіоастрономічному інституті НАН України демонструють можливість застосування таких антен у низькочастотній радіоастрономії. В результаті виконання дослідницьких робіт було запропоновано критерії оцінки характеристик таких антен, а досвід їх експлуатації у складі фазованої антенної решітки радіотелескопа ГУРТ показує їхню високу чутливість у широкій смузі частот, завадостійкість та експлуатаційну надійність. Висока чутливість таких антен у широкій смузі частот забезпечується використанням малошумного антенного підсилювача.

Розроблена активна антена складається з двох однакових диполів, орієнтованих ортогонально один до одного, і підключених до їхніх клем малошумних підсилювачів (МШП). Кожен з диполів є ідентичним диполу ГУРТ із масштабованими удвічі розмірами задля переміщення смуги його робочих частот у нижчий діапазон. На рис. 1 наведено ескіз одного з диполів, де H – висота клем диполя над поверхнею ґрунту, h – відстань від найнижчої точки диполя до поверхні ґрунту, $H = h + 1.837$ м. Диполь складається з двох симетричних плечей, нахилених донизу під кутом $\gamma = 45^\circ$. На етапі тестування диполь (рис. 1) був виготовлений з гнучкого коаксіального кабелю, зовнішній провідник якого діаметром 7 мм відіграв роль звичайного металевого дроту. Для

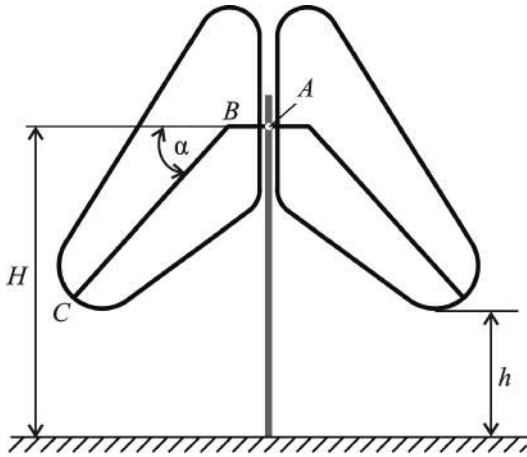


Рис. 1. Конструкція досліджуваної антени

надання диполю заданої геометричної форми кабель було розміщено всередині жорсткої пластикової труби діаметром 25 мм.

МШП також є ідентичними. З їхніх виходів знімаються прийняті антеною сигнали, що переносяться електромагнітними хвилями двох взаємно ортогональних лінійних поляризацій. МШП розроблені у двох варіантах: один – для попереднього тестування антени на Землі, другий – для місячної місії. Перший з них є таким саме, як МШП радіотелескопа ГУРТ [12], зі схеми якого вилучено індуктивності L1 і L2 задля розширення смуги активної антени у бік нижніх частот. Другий був розроблений спеціально для умов застосування у місячному радіотелескопі, його докладний опис наведено у розділі 5 цієї статті. Обидва варіанти МШП виготовлені за балансною схемою і забезпечують коефіцієнт підсилення за потужністю $G_{\text{amp}} = 22 \div 24$ дБ, а також виконують функції симетрування і узгодження, здійснюючи коректний перехід від симетричних клем диполя до несиметричного коаксіального кабелю з хвильовим опором $Z_c = 50$ Ом.

3. Математична модель активної антени

Теорія активної приймальної антени і методика визначення її параметрів докладно викладені у роботах [13, 14], з яких ми будемо брати у ході аналізу необхідні співвідношення. Будемо вважати, що відомі такі параметри диполя: імпеданс $Z = R + jX$ або коефіцієнт відбиття від його входу $\Gamma = (Z - Z_c)/(Z + Z_c)$; коефіцієнт корисної дії η , що враховує теплові втрати енергії у ґрунті; нормована діаграма направленості (ДН) $F(\theta, \varphi)$;

коефіцієнт направленої дії D_m у напрямку максимуму головної пелюстки ДН. Функціональна схема активної антени складається з диполя і МШП, який представлений лінійним чотирьохполюсником. Будемо вважати також, що електричні параметри МШП задані матрицею розсіювання \mathbf{S} , а шумові параметри – коваріаційною матрицею спектральних густин шумових хвиль \mathbf{C} [13]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}.$$

Оскільки антена працює у приймальному режимі, припустимо, що вона збуджується плоскою електромагнітною хвилею з густиною потоку потужності S^i , що приходить з напрямку (θ, φ) . У цьому разі потужність прийнятого сигналу на виході активної антени можна визначити як [13]

$$P_2(\theta, \varphi) = S^i A_{2e} |F(\theta, \varphi)|^2 = S^i A_e \kappa |F(\theta, \varphi)|^2,$$

де $A_e = 4\pi D_m / \lambda^2$ – ефективна площа диполя, λ – довжина хвилі у вільному просторі; A_{2e} – ефективна площа активної антени, що приведена до її виходу,

$$A_{2e} = \kappa A_e,$$

κ – коефіцієнт передачі активної антени.

Останній визначається добутком

$$\kappa = \eta G_T = \eta G_P \chi,$$

де $G_T = G_P \chi$ – коефіцієнт підсилення МШП за потужністю, який розбито на два множники, G_P і χ , перший з яких є коефіцієнтом підсилення (за потужністю) МШП з ідеально узгодженим входом,

$$G_P = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2},$$

а другий враховує імпедансне розузгодження МШП з диполем,

$$\chi = \frac{(1 - |\Gamma|^2)(1 - |S_{11}|^2)}{|1 - \Gamma S_{11}|^2}.$$

Для оцінки чутливості активної антени слід знати повну (або системну) шумову температуру на її виході $T_{2\text{sys}}$, що має дві складові

$$T_{2\text{sys}} = T_{2\text{ext}} + T_{2\text{int}},$$

де $T_{2\text{ext}}$ і $T_{2\text{int}}$ – зовнішня та внутрішня температури шуму відповідно на виході активної антени.

Зовнішня температура шуму обумовлена прийманням галактичного і позагалактичного випромінювання [13],

$$T_{2\text{ext}} = \kappa T_B,$$

де T_B – це яскравісна температура неба.

Для обчислення T_B скористаємося формулою, що дійсна в діапазоні частот $1 \div 100$ МГц [15]:

$$T_B = \frac{\lambda^2}{2k_B} \left(I_g f_M^{-0.52} \frac{1 - e^{-\tau(f_M)}}{\tau(f_M)} + I_{eg} f_M^{-0.8} e^{-\tau(f_M)} \right), \quad (1)$$

де $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; I_g і I_{eg} – інтенсивності потоків галактичного та позагалактичного шуму відповідно, $I_g = 1.3 \cdot 2.48 \cdot 10^{-20}$ Вт/(Гц·м²·ср); $I_{eg} = 1.06 \cdot 10^{-20}$ Вт/(Гц·м²·ср); f_M – частота, МГц; $\tau(f_M) = 5f_M^{-2.1}$.

Формула (1) одержана у [15] за результатами дослідження полярних областей неба і скоригована у [16, 17] за допомогою множника 1.3 у виразі для I_g , що дає можливість застосовувати її для оцінки усередненої яскравісної температури всієї небесної сфери.

Всі шумові температури на виході можна привести до входу ідеально узгодженого МШП за допомогою співвідношення

$$T_{\text{sys,ext,int}} = T_{2\text{sys,ext,int}} / G_P.$$

Отримані таким чином еквівалентні шумові температури $T_{\text{sys,ext,int}}$ не залежать від коефіцієнта підсилення МШП, а тому їх зручно використовувати для порівняння різних активних антен, а також для оцінки внеску інших джерел шуму в значення T_{sys} на тлі шумів МШП. Еквівалентна внутрішня шумова температура активної антени може бути записана у вигляді суми:

$$T_{\text{int}} = T_{\text{amp}} + T_A,$$

де T_{amp} – еквівалентна шумова температура МШП, що залежить від узгодження МШП з диполем; $T_A = T_{\text{dip}} + T_{\text{gnd}}$ – складова еквівалентної шумової температури активної антени, яка обумовлена наявністю втрат в матеріалі диполя T_{dip} і в неідеальній землі

$$T_{\text{gnd}} = T_0(1 - \eta)\chi,$$

T_0 – температура оточуючого середовища. Формула для розрахунку шумової температури T_{amp} має такий вигляд [13]:

$$T_{\text{amp}} = \frac{1}{k_B} \frac{\chi}{1 - |\Gamma|^2} \left[|\Gamma|^2 C_{11} + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{\Gamma C_{12}}{g^*} \right) + \frac{C_{22}}{|g|^2} \right].$$

Тут $g = S_{21}/(1 - S_{11}\Gamma)$ – коефіцієнт підсилення МШП за напругою, “*” – знак комплексного спряження.

Наведені вище співвідношення служать надійною і достатньою базою для аналізу необхідних нам електричних і шумових параметрів активної антени.

Головним показником якості радіотелескопа є його чутливість, яка зазвичай оцінюється мінімальною густиною потоку потужності електромагнітної хвилі, яку він здатний виявити на тлі шумів. Для антени з одною поляризацією вона визначається як [18]

$$\Delta S_{\text{min}} = \frac{2k_B T_{2\text{sys}}}{A_{2e} \sqrt{\Delta f \tau n}} = \frac{\text{SEFD}}{\sqrt{\Delta f \tau n}},$$

де Δf – смуга пропускання приймача; τ – час інтегрування після детектора; n – число усереднених записів. Величина SEFD (System Equivalent Flux Density) – це системна еквівалентна густина потоку потужності [19],

$$\text{SEFD} = \frac{2k_B T_{2\text{sys}}}{A_{2e}} = \frac{2k_B T_B}{A_e} \left(1 + \frac{1}{\text{SND}} \right),$$

де SND (Sky Noise Dominance) – перевищення зовнішньої температури антени T_{ext} над внутрішньою T_{int} , що визначається як їх відношення [20],

$$\text{SND} = \frac{T_{\text{ext}}}{T_{\text{int}}}. \quad (2)$$

4. Числовий аналіз та експериментальні випробування активної антени

Була створена комп'ютерна модель досліджуваної активної приймальної антени, яка дозволяє отримувати її електричні й шумові параметри, а також характеристики направленості. Для розрахунків параметрів диполя використовувалась відома програма NEC-2 (Numerical Electromagnetic Code), призначена для числових розрахунків дрютяних антен, розташованих над реальним ґрунтом. За її допомогою були обчислені імпеданс, коефіцієнт корисної дії та ефективна площа досліджуваного диполя у широкому діапазоні частот від 1 до 70 МГц.

Польові випробування активної антени виконувалися влітку 2019 і 2020 рр. в Радіоастрономічній обсерваторії ім. С. Я. Брауде.

На рис. 2, а наведено результати обчислення реактивної частини імпедансу диполя з параметрами $H = 3.06$ м, $h = 1.25$ м у діапазоні частот 1 ÷ 70 МГц – суцільна лінія, а точками показано результати вимірювань, виконаних на реальному макеті. Цей рисунок свідчить про хороший збіг результатів моделювання і експерименту. На рис. 2, б зображені графіки частотної залежності активної частини імпедансу диполя, отримані шляхом обчислень (суцільна лінія) і експерименту (точки). Цей рисунок, на відміну від попереднього, демонструє деяку розбіжність результатів, яку, втім, доволі легко пояснити. В центральній частині діапазону частот, від 20 до 45 МГц, збіг між результатами моделювання і вимірювань цілком прийнятний. На вищих частотах хід експериментальної кривої залишається таким самим, як і теоретичної, але випереджає її на ≈ 5 МГц. Такий зсув, найімовірніше, є наслідком похибок у виготовленні дослідного зразка антени, особливо в області, близькій до точки її збудження. На частотах 15 МГц і менше також існують помітні розбіжності між результатами обчислень і вимірювань, які збільшуються зі зниженням частоти. Коректність результатів розрахунків не викликає сумніву, оскільки з теорії антен відомо, що активна частина імпедансу малого електричного диполя, незалежно від

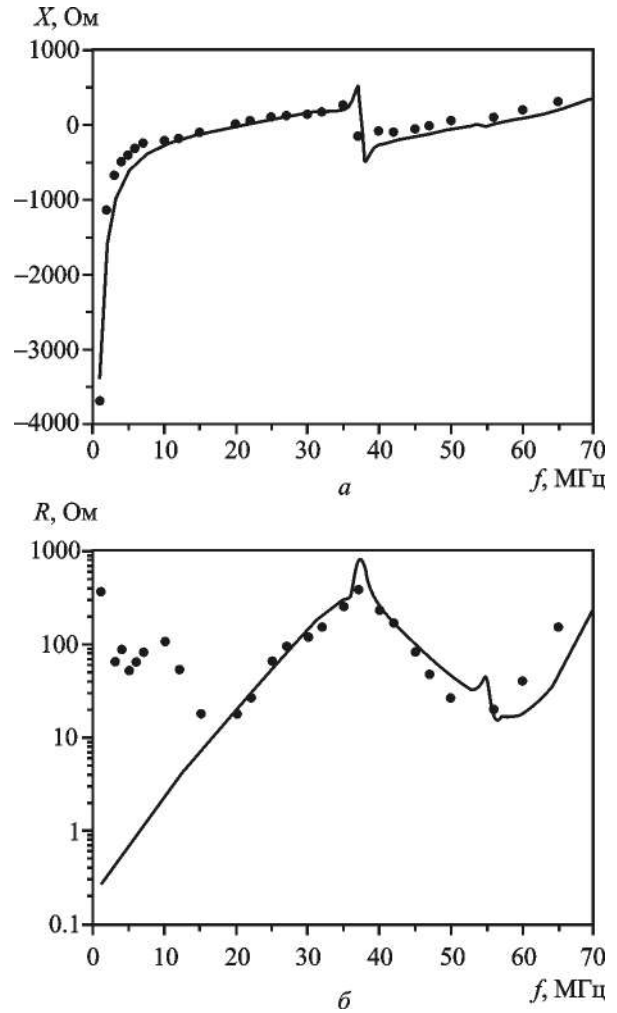


Рис. 2. Залежність імпедансу диполя $Z = R + jX$ від частоти (суцільна лінія – результати обчислення, точки – результати вимірювань): а – реактивна частина X ; б – активна частина R

його конфігурації, падає із зменшенням частоти за квадратичним законом. Саме таку частотну залежність демонструє активний опір диполя. Відмінності експериментальних даних від теоретичних можна пояснити лише інструментальними похибками вимірювань. З рис. 2 випливає, що розбіжність між кривими збільшується зі зниженням частоти, що супроводжується різким зростанням модуля реактивного опору диполя і не менш різким падінням його активної складової. Проте це не дивно, оскільки великі похибки вимірювань імпедансів навантажень з високою добротністю притаманні вимірювачам коефіцієнта відбиття і коефіцієнта стоячої хвилі, до яких належить прилад “Обзор-103”, що застосовувався під час експериментів.

Експериментальні дослідження шумових характеристик активної антени виконувалися виключно в нічний час через високий рівень радіозавад вдень. На рис. 3 наведено відносні шумові температури активної антени, виміряні на вході віддаленого приймача АDR, для трьох режимів її роботи: 1) у штатному режимі, коли вона приймає зовнішні сигнали ($T_{3\text{sys}}$); 2) у режимі холостого ходу (нижній індекс "ос"), коли МШП від'єднано від диполя і вхід його розімкнено ($T_{3\text{oc}}$); 3) у режимі короткого замикання (нижній індекс "sc"), коли МШП від'єднано від диполя, а вхід його накоротко замкнено ($T_{3\text{sc}}$). Слід зазначити, що частотні характеристики цих шумових температур дещо відрізняються від таких самих на виході активної антени ($T_{2\text{sys}}$, $T_{2\text{oc}}$ і $T_{2\text{sc}}$) через вплив частотної характеристики передачі ВЧ тракту, що з'єднує антену з приймачем [13, 14]. На цьому рисунку видно, що навіть вночі радіозавади не тільки спотворюють виміряний спектр відносної шумової температури активної антени $T_{3\text{sys}}$ на частотах нижчих за 13 МГц, але й проникають у МШП через замкнений і відкритий його вхід.

З рис. 3 випливає, що у більшій частині розглядуваного діапазону частот домінуючий внесок у системну температуру $T_{3\text{sys}}$ дає складова $T_{3\text{ext}}$, що дозволяє наближено прийняти $T_{3\text{ext}} \approx T_{3\text{sys}}$. Відомо також, що шуми МШП домінують серед власних шумів активної антени $T_{\text{int}} \approx T_{\text{amp}}$ [13, 14],

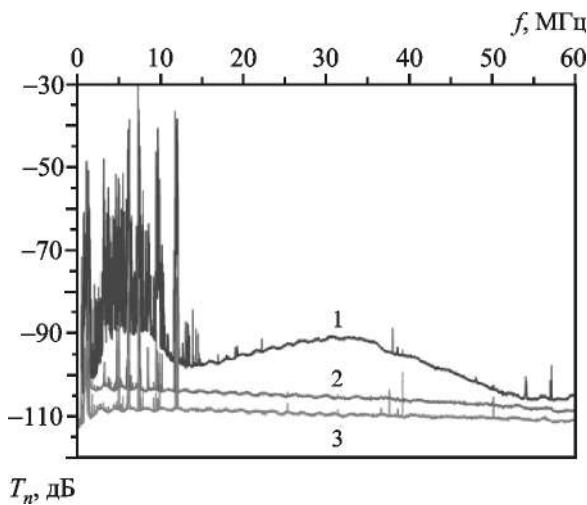


Рис. 3. Експериментальні спектри відносних шумових температур активної антени у різних режимах роботи: 1 – у штатному режимі ($T_{3\text{sys}}$); 2 – із розімкненим входом МШП ($T_{3\text{oc}}$); 3 – з короткозамкненим входом МШП ($T_{3\text{sc}}$)

тому шумові температури $T_{3\text{sc}}$ і $T_{3\text{oc}}$ можна вважати наближеними граничними значеннями шумової температури T_{int} . Це дає підстави й відношення $\text{SND}_{\text{sc}} = T_{3\text{sys}}/T_{3\text{sc}}$ і $\text{SND}_{\text{oc}} = T_{3\text{sys}}/T_{3\text{oc}}$ розглядати як наближені оцінки граничних значень SND (2).

На рис. 4 показано експериментальні частотні залежності SND_{sc} і SND_{oc} активної антени, отримані з рис. 3 шляхом віднімання відповідних кривих, а також шляхом обчислень за допомогою наведеної вище математичної моделі. Додатково на рис. 4 показана обчислена частотна залежність SND за формулою (2). На цьому рисунку наочно проглядається хороша збіжність результатів обчислення і експерименту. Крім того, видно, що крива частотної залежності SND дійсно лежить між кривими SND_{sc} і SND_{oc} , які ми прийняли за граничні, майже у всьому діапазоні частот. Виключенням є дві крайні ділянки діапазону, нижня ($f < 5$ МГц) і верхня ($f > 56$ МГц), де крива SND виходить за умовні межі. Це пояснюється тим, що прийняті нами припущення на цих ділянках стають некоректними. Так, у нижній ділянці стає недійсним припущення $T_{3\text{ext}} \approx T_{3\text{sys}}$ через різке зменшення $T_{3\text{ext}}$, спричинене сильним розузгодженням імпедансів диполя і МШП, а у верхній ділянці вже не працює припущення $T_{\text{int}} \approx T_{\text{amp}}$ через помітне зростання шумів диполя, яке не можна ігнорувати. У смузі від 5 до 56 МГц крива SND почергово наближається до

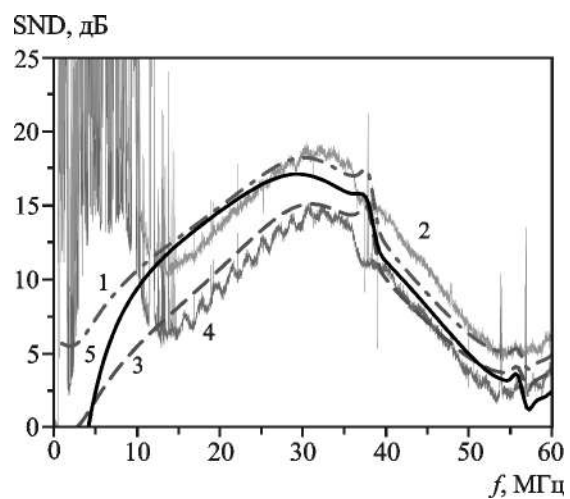


Рис. 4. Частотні залежності величини SND активної антени: 1 – обчислена SND_{sc} ; 2 – виміряна SND_{sc} ; 3 – обчислена SND_{oc} ; 4 – виміряна SND_{oc} ; 5 – обчислена за формулою (2)

обох границь, залежно від того, до чого ближче імпеданс диполя, до SND_{sc} чи SND_{oc} . Так, на частотах $5 \div 10$ МГц крива SND ближча до SND_{oc} , на частотах від 10 до 40 МГц – до SND_{sc} , а на верхніх частотах знов ближча до SND_{oc} . Максимальне значення $SND \approx 17$ дБ спостерігається поблизу частоти 30 МГц. Ширина смуги частот, де SND зберігає значення понад 6 дБ, складає ≈ 40 МГц, а де понад 3 дБ складає ≈ 50 МГц.

5. Малошумний підсилювач активної антени

Умови роботи активної антени на зворотному боці Місяця радикально відрізняються від земних. Насамперед це стосується температурного режиму, оскільки на поверхні Місяця температура зазнає значних коливань, від -173 °С вночі до $+127$ °С вдень. До того ж там бракує потужних джерел електричної енергії. Тому для ефективного використання антени за таких умов її конструкція має задовольнити низці вимог, серед яких не останнє місце посідають економічність у енергоспоживанні й висока термостабільність, які головним чином стосуються МШП.

Відомо, що проблема термостабільності транзисторних підсилювачів, або ширше, термічної стійкості, може вирішуватися за допомогою активного термостатування. Однак активні термостати (терморегулятори) споживають забагато енергії, у рази більше ніж транзисторні підсилювачі, тому варто розглянути інші підходи до вирішення цієї проблеми.

Наразі існує декілька технологій виготовлення транзисторів, які забезпечують їхню роботу у широкому діапазоні температур. По-перше, це кремнієва технологія: CMOS, BiCMOS, SOI та інші. Відразу виключимо з розгляду дешеві елементи побутової електроніки в класі “civil”, оскільки щодо їхньої надійності виникає багато запитань. Інтервал температур приладів класів “industrial” та “military” становить від -40 до $+60$ °С. В деяких випадках кремнієві транзистори можуть працювати в розширеному діапазоні (клас “space”, термостійкі до 200 °С, стійкі до радіації), але це є виробни вузької номенклатури, комерційно недоступні. Нарешті, деградація характеристик кремнієвих транзисторів, особливо НВЧ малопотужних (зі слабким самопрогрівом), при температурах менше -60 °С є надто

великою. Цього недоліку позбавлені напівпровідникові транзистори на основі кремнію або германію, зокрема НВТ (heterojunction bipolar transistor), але у них виникають проблеми вже з високими температурами. Транзистори на основі широкозонних напівпровідників на нітриді галію та карбіді кремнію призначені здебільшого для силових й особливо високотемпературних застосувань, де економічність є другорядним параметром. Навпаки, транзистори на вузькозонних напівпровідниках (антимонід індію, антимонід галію) є високоекономічними і працездатними при глибокому охолодженні, але їхні параметри не є стійкими до нагрівання.

Найуніверсальнішими є прилади на базі (підкладках) арсеніду галію (GaAs) і фосфіду індію (InP). Їх можна умовно віднести до “середньозонних”. Польові транзистори з високою рухливістю електронів (HEMT) на InP і GaAs поєднують відмінні частотні, підсилювальні і шумові характеристики з можливістю охолодження до криогенних температур. Ці транзистори широко використовуються в телекомунікації та радіоастрономії [21]. Однак InP-технологія є надзвичайно витратною, а продукція представлена тільки класом замовлених виробів, здебільшого для міліметрового діапазону довжин хвиль. У комерційно доступному класі перебувають транзистори на основі GaAs, зі структурою активної області на In-GaAs-Al, так звані “псевдоморфні” HEMT (PHEMT). Ми зупинили вибір саме на PHEMT для нашого МШП.

Щодо роботи обраних транзисторів в умовах підвищених температур, можна зазначити, що для малопотужних PHEMT різних типів допускається температура каналу, близька до 150 °С. В нашому випадку йдеться про пристрій, в якому транзистор розсіює потужність не більше 10 мВт, до того ж ефект його саморозігріву є мінімальним. Так, перегрів каналу транзистора в металокерамічному корпусі (60 °С/Вт) не перевищить 1 °С, тому є всі підстави вважати, що верхня межа робочого інтервалу температур буде вищою необхідних $+127$ °С. Основна неясність – чи можна в необхідному інтервалі температур (від -173 до $+127$ °С) забезпечити не лише загальну працездатність, але й зберегти основні параметри підсилювача. Для експериментальної перевірки сформульованих припущень було спроектовано широкосмуговий МШП.

Принципова схема МШП показана на рис. 5. Балансна схема дозволяє отримувати прийнятний для практики коефіцієнт підсилення G близько 22 дБ. Структура вхідного та вихідного узгоджувальних кіл відповідає рекомендаціям виробника транзисторів і загалом традиційна для таких пристроїв. При розрахунку і моделюванні використовувалися довідникові значення S -параметрів і елементів еквівалентної схеми транзисторів. Активна частина вихідного імпедансу приймалася рівною опору стік–витік при постійному струмі в актуальному режимі зсуву/живлення. З метою підвищення економічності в підсилювачі використано вузькозатворні (200 мкм) транзистори. Додаткове підвищення економічності досягається використанням транзисторів у режимі, близькому до ненасиченого, при напрузі стік–витік менше 1 В. S -матриця транзисторів в цьому режимі в заданому діапазоні частот виробником не паспортизується. Однак з усіх елементів S -матриці до зміни режиму найбільш чутливими є коефіцієнт прямої передачі і комплексний коефіцієнт відбивання на виході або нормований вихідний імпеданс. Для розрахунку

вихідного узгоджувального кола важливо знати дійсну частину цього імпедансу (реактивна компонента змінюється слабо), тому вона вимірювалася спеціально. Пріоритетним у конструюванні підсилювачів на вузькозатворних транзисторах постає забезпечення стійкості, оскільки інваріантний коефіцієнт стійкості цих приладів перевищує одиницю лише на частотах вище $4 \div 6$ ГГц. Стабілізація робочої точки здійснюється за рахунок кіл автозміщення, які складаються з резисторів $R5, R9$ для транзистора VT1 і $R6, R10$ для транзистора VT2 (рис. 5). Конструктивно підсилювач виконано на підкладці розміром 10×20 мм (матеріал ФДМ-2-0.25, склотекстоліт). Пасивні елементи – SMD типорозміру 0603. В процесі попередніх тестів нами виконувались випробування елементів на стійкість до швидкого термоциклювання – кожен відібраний компонент занурювався в рідкий азот (-196 °C) і відігрівався протягом 1 хв 20 разів поспіль (20 циклів). Для всіх тестованих транзисторів (лоти по 20 примірників: AVAGO ATF38143, ATF35143, NE3210S01, FHC40LG) відмови не спостерігалися. З перелічених моделей для застосування у підсилювачі

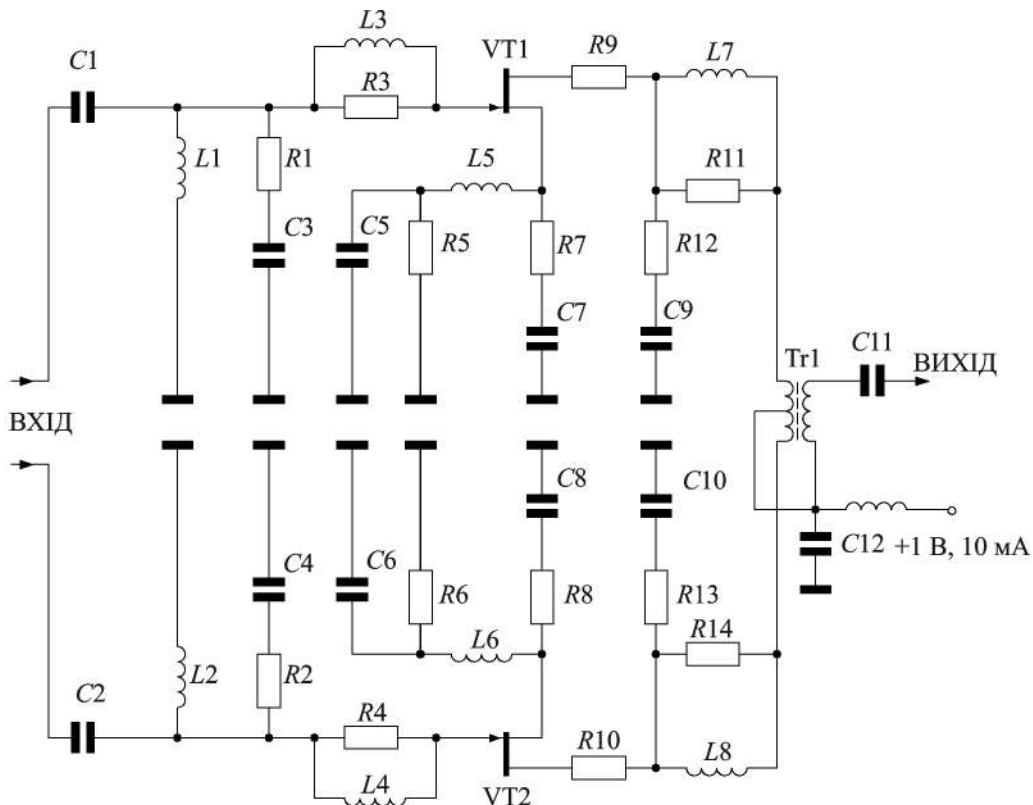


Рис. 5. Спрощена принципова схема МШП

відібрано транзистор моделі ATF38143, який не демонструє змін струму витоку затвора (ознак деградації).

Як показує амплітудно-частотна характеристика, такий підсилювач можна живити напругою $(1 \pm 0.15) \text{ В}$ без будь-якої додаткової стабілізації [21]. З вимірювань випливає, що температурні варіації коефіцієнта підсилення не перевищують $0.015 \text{ дБ/}^\circ\text{С}$ і цілком задовольняють вимогам щодо стабільності підсилювачів активної антени. Відзначимо, що за паспортом транзисторам РНЕМТ властива стабільність близько $0.03 \text{ дБ/}^\circ\text{С}$. Підвищена стабільність в нашому випадку є результатом дії автозміщення і місцевих зворотних зв'язків ($L1, L2$ на рис. 5). Вимірне значення шумової температури підсилювача T_n у всьому діапазоні робочих частот при напрузі живлення понад 0.7 В не перевищує 20 К за температури навколишнього середовища $T_0 = -100^\circ\text{С}$ і $T_n \leq 100 \text{ К}$ при $T_0 = 100^\circ\text{С}$. Коефіцієнт стоячої хвилі за входом/виходом – в межах $2.5/1.5$. Споживана потужність при варіаціях напруги живлення в межах $0.5 \div 1.5 \text{ В}$ становить $3 \div 20 \text{ мВт}$.

Всі виміряні характеристики дозволяють класифікувати підсилювач як малощумний, високо-економічний, з високою температурною стабільністю електричних характеристик. Видається обґрунтованим висновок щодо перспективності

використання GaAs РНЕМТ у підсилювачах дрових низькочастотних активних антен радіоастрономічного застосування, що працюють в екстремальних експлуатаційних умовах Місяця.

6. Радіоастрономічні спостереження

Оскільки створений антенний елемент при тестуванні показав цілком прийнятні характеристики, було вирішено перевірити його придатність для реальних радіоастрономічних спостережень у земних умовах. Успішні радіоастрономічні спостереження в земних умовах дозволяють впевнено стверджувати, що при виготовленні антени з матеріалів і компонентів, придатних для роботи в умовах космосу, антена буде працювати не гірше і на поверхні Місяця. Першим етапом такого випробовування стала реєстрація фонових випромінювань Галактики, яка водночас є хорошим підтвердженням високої чутливості антени. На рис. 6 показано динамічний спектр зміни шумової температури внаслідок добової зміни видимого радіовипромінювання Галактичного фону, прийнятого розробленою антеною протягом двох діб, отриманий на цифровому спектральному аналізаторі АDR [22]. На динамічному спектрі на частотах починаючи від 5 МГц видно періодичну добову зміну шумової температури антени, викликану зміною видимої ділянки небесної сфери з різною інтегральною яскравісною темпе-

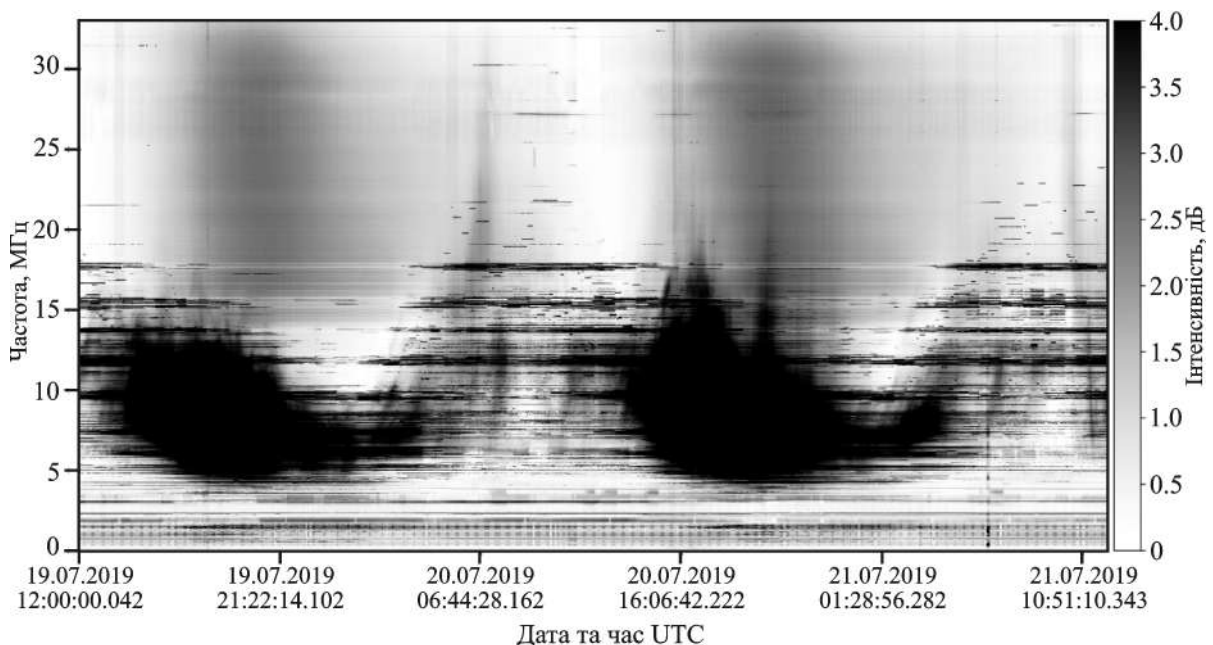


Рис. 6. Реєстрація зміни антенної температури Галактичного фону протягом двох діб у смузі частот $4 \div 33 \text{ МГц}$

ратурою фону. Це демонструє чутливість антени до варіацій Галактичного фону.

За допомогою активної антени було проведено також спостереження радіовипромінювання активного Сонця. Зареєстровано доволі потужний сонячний радіосплеск, попри те, що тестування виконувалося під час мінімуму циклу сонячної активності. 29 травня 2020 р. група сонячних плям викликала найбільший сонячний спалах з жовтня 2017 р. [23], який відноситься до М класу. Виникнення такого спалаху дозволило припустити продовження сонячної активності в наступні дні і можливість реєстрації сонячних радіосплесків на початку червня 2020 р. Активна область NOAA AR12765 з'явилася на лімбі зі східного боку Сонця 3 червня 2020 р. [24]. Спочатку вона являла собою пляму, яка 5 червня 2020 р. перетворилася на невеликий біполярний регіон, розташований на північний схід від початкової плями. Біполярні магнітні поля цікаві перш за все тим, що можуть породжувати U-подібні сонячні радіосплески, які виникають внаслідок руху електронних пучків в сонячній плазмі вздовж замкнених магнітних силових ліній [25]. Саме такий сплеск було зареєстровано 5 червня 2020 р. за допомогою активної антени для місячного радіотелескопа. Сплеск спостерігався о 9:37 UT в смузі частот від 6 до 66 МГц, його динамічний

спектр показано на рис. 7. Зміна знаку швидкості частотного дрейфу у такого сплеску добре простежується на ділянці спектру від 15 до 20 МГц.

Того дня спостереження радіовипромінювання активного Сонця проводилося також на радіотелескопі ГУРТ, динамічний спектр зареєстрованого сплеску показано на рис. 8. Завдяки вищій чутливості радіотелескоп ГУРТ зафіксував групу сплесків, один з яких був U-подібний, а інші, більш слабкі, – III-го типу. U-подібний сплеск на динамічному спектрі ГУРТ має тонку структуру, яка чітко показує, що деякі з пучків електронів рухалися до Землі, а інші пучки повернулись назад до Сонця завдяки аркам магнітного поля. Отримані динамічні спектри демонструють подібність частотно-часових параметрів того самого сплеску, що свідчить про адекватність роботи та рівномірну чутливість розробленої антени у робочому діапазоні частот.

7. Висновки

У рамках цієї роботи було виконано дослідження характеристик активної антени складної геометрії, розташованої над частково провідним ґрунтом, яку планується використовувати як елемент антенної решітки низькочастотного радіотелескопа на зворотному боці Місяця. Розроблено і виготовлено МШП активної антени з робочою

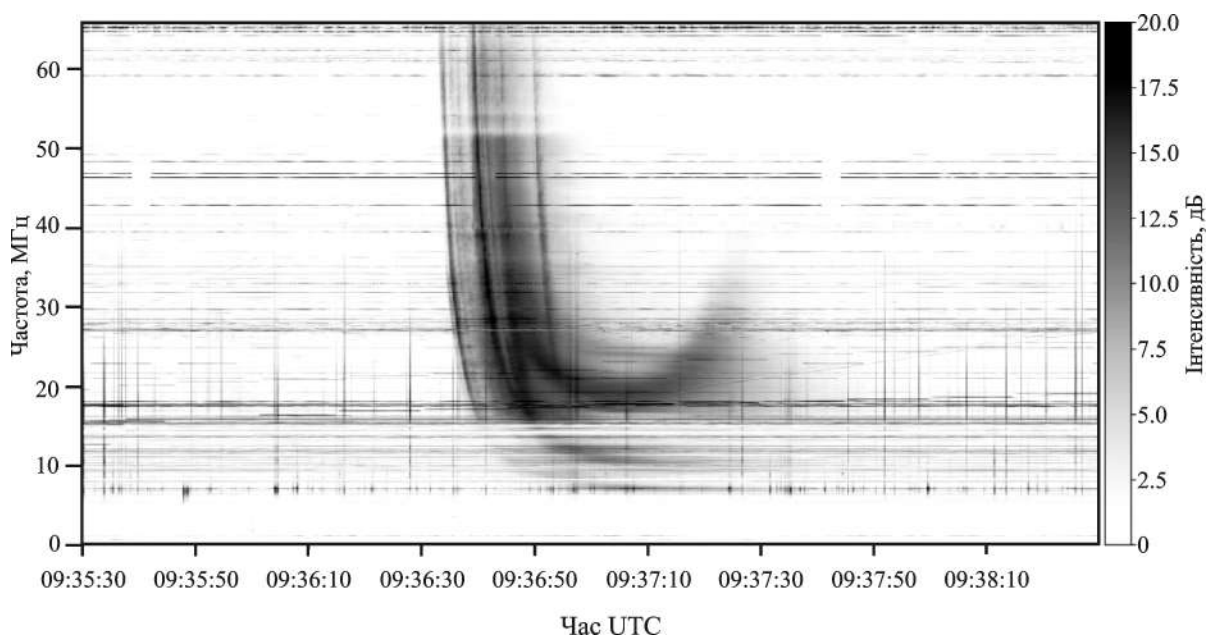


Рис. 7. Динамічний спектр U-подібного сплеску низькочастотного радіовипромінювання Сонця, який спостерігався 5 червня 2020 р. за допомогою прототипу антенного елемента місячного радіотелескопа

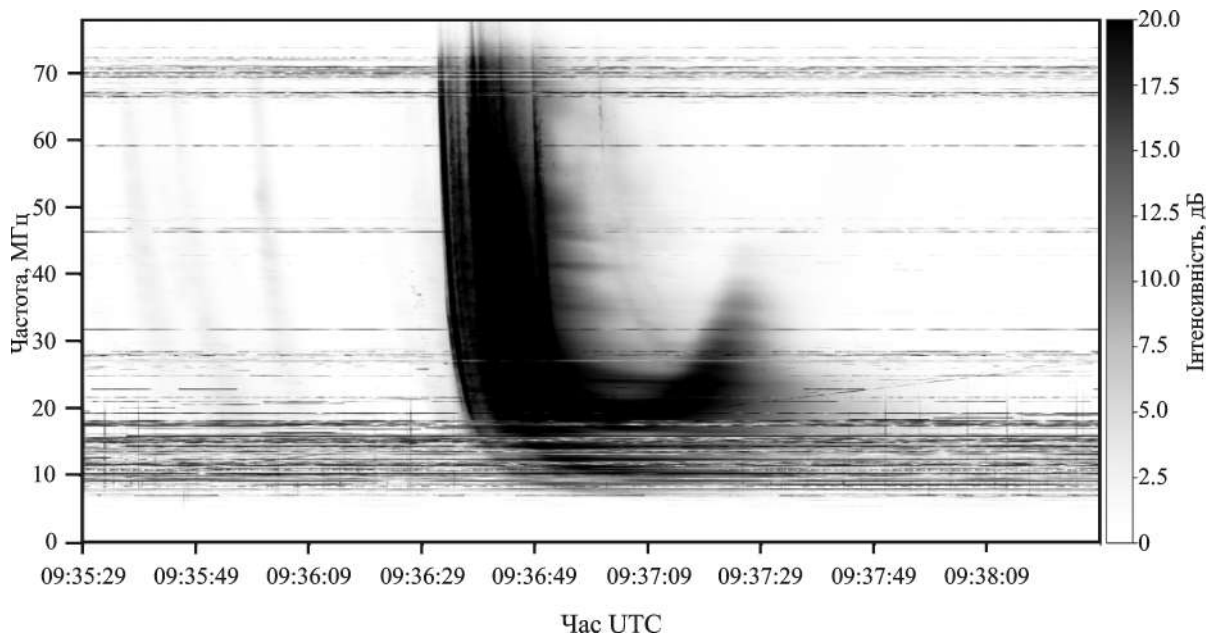


Рис. 8. Динамічний спектр сонячних сплесків, отриманий 5 червня 2020 р. за допомогою субрешітки ГУРТ

смугою частот $4 \div 40$ МГц, придатний для роботи у жорстких температурних умовах місячної поверхні. Виконано комп'ютерне моделювання досліджуваної антени, за результатами якого отримано її параметри у широкій смузі частот від 1 до 70 МГц, зокрема вхідний імпеданс, коефіцієнт корисної дії та чутливість. Для перевірки результатів числових розрахунків виконано натурні вимірювання вхідного імпедансу антени, результати яких досить добре узгоджуються з результатами моделювання. Здійснено тестові радіоастрономічні спостереження в земних умовах у Радіоастрономічній обсерваторії ім. С. Я. Брауде, які дозволили зареєструвати добові варіації видимого Галактичного фону в широкій смузі частот, що свідчить про достатню чутливість розробленої активної антени. За допомогою розробленої антени зареєстровано також сплески сонячного радіовипромінювання у широкій смузі частот. Отримані результати додають впевненості щодо можливості ефективного застосування цієї антени у радіотелескопі на зворотному боці Місяця для досліджень випромінювання космічних радіоджерел.

Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (державний реєстраційний номер 0121U109536, 2021 р.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shkuratov Y. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S., Videen G., Zarka P., and Rucker H. O. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 154. P. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
2. Шкуратов Ю. Г., Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Станіславський, О. О., Баннікова О. Ю., Кайдаш В. Г., Станкевич, Д. Г., Корохін В. В., Ваврів Д. М., Галушко В. Г., Єрін С. М., Бубнов І. М., Токарський П. Л., Ульянов О. М., Степкін С. В., Литвиненко Л. М., Яцків Я. С., Вайдін Г., Зарка Ф., Рукер Х. О. Українська місія на Місяць: цілі та корисне навантаження. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 1. С. 3–30. DOI: 10.15407/knit2018.01.003
3. Jester S. and Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.* 2009. Vol. 53, Is. 1-2. P. 1–26. DOI: 10.1016/j.newar.2009.02.001
4. Mimoun D., Wiczorek M. A., Alkalai L., Banerdt W. B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H., Flohrer J., Garcia R. F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C. L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konovalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné P., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan G., and Zarka P. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.* 2012. Vol. 33, Is. 2-3. P. 529–585. DOI: 10.1007/s10686-011-9252-3
5. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Griebmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Kono-

- valenko A., Lamy L., Mimoun D., and Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 74, Is. 1. P. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
6. Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Yerin S. N., Bubnov I. N., Zakharenko V. V., Shkuratov Yu. G., Tokarsky P. L., Yatskiv Ya. S., Brazhenko A. I., Frantsuzenko A. V., Dorovskyy V. V., Rucker H. O., and Zarka Ph. Solar bursts as can be observed from the lunar farside with a single antenna at very low frequencies. *Astron. Nachr.* 2018. Vol. 339, Is. 7-8. P. 559–570. DOI: 10.1002/asna.201813522
 7. 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., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
 8. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. N., Lecacheux A., Rosolen C., and Rucker H. O. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2003. Vol. 16, Is. 3. P. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
 9. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., and Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* 2011. Vol. 32, Is. 2. P. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
 10. Stanislavsky A. A., Bubnov I. N., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Shevchenko V. V., Stanislavsky L. A., Mukha D. V., and Koval A. A. First radio astronomy examination of the low-frequency broadband active antenna subarray. *Adv. Astron.* 2014. Vol. 2014. id. 517058. DOI: 10.1155/2014/517058
 11. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., and Yerin S. N. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. Vol. 65, Is. 9. P. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238
 12. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N., and Bubnov I. N. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part I: Design and Theoretical Model. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019. Vol. 67, Is. 12. P. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841
 13. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2016. Т. 21. № 1. С. 48–57. DOI: 10.15407/rpra21.01.048
 14. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н. Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2015. Т. 20, № 2. С. 142–153. DOI: 10.15407/rpra20.02.142
 15. Cane H. V. Spectra of the non-thermal radio radiation from the galactic polar regions. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1979. Vol. 189, Is. 3. P. 465–478. DOI: 10.1093/mnras/189.3.465
 16. Dulk G. A., Erickson W. C., Manning R., and Bougeret J.-L. Calibration of low-frequency radio telescopes using the galactic background radiation. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 365, No. 2. P. 294–300. DOI: 10.1051/0004-6361:20000006
 17. Duric N., Theodorou A., Smith K., Zouaoui G., Harris M., Junor W., and Gaussiran T. RFI report for the U.S. South-West. 2003. URL: ftp://gemini.haystack.edu/pub/lofar/siting_docs/SWUS_RFI.doc (дата звернення: 11.07.2021).
 18. Краус Дж. Д. *Радиоастрономия.* Пер. с англ. под ред. В. В. Железнякова. Москва: Сов. радио, 1973. 456 с.
 19. Wrobel J. M., and Walker R. C. Sensitivity. In: G. B. Taylor, C. L. Carilli, and R. A. Perley, eds. *Synthesis imaging in radio astronomy II, ASP Conference Series.* 1999. Vol. 180. P. 171–179.
 20. Hicks B. C., Paravastu-Dalal N., Stewart K. P., Erickson W. C., Ray P. S., Kassim N. E., Burns S., Clarke T., Schmitt H., Craig J., Hartman J., and Weiler K. W. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2012. Vol. 124, No. 920. P. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121
 21. Королев А. М. Гетероструктурные полевые транзисторы как активные элементы приемных устройств для особо жестких условий эксплуатации. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2014. Т. 19, № 2. С. 181–185. DOI: 10.15407/rpra19.02.181
 22. 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., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
 23. Fox K. and Tran L. New Sunspots Potentially Herald Increased Solar Activity. *NASA: Space Weather.* 2020. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/new-sunspots-herald-increased-solar-activity-cycle-sdo> (дата звернення: 13.07.2021).
 24. Real-time auroral and solar activity. *SpaceWeatherLive.* 2020. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/region/12765> (дата звернення: 13.07.2021).
 25. Zheleznyakov V. V. *Radio Emission of the Sun and Planets.* Oxford: Pergamon Press, 1970. 712 p.

REFERENCES

1. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYNENKO, L. N., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2019. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica*. vol. 154, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
2. SHKURATOV, YU. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYNENKO, L. M., YATSKIV, YA. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2018. Ukrainian Mission to the Moon: how to and with what. *Space Sci. Technol.* vol. 24, no. 1, pp. 3–30. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2018.01.003
3. JESTER, S. and FALCKE, H., 2009. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron. Rev.* vol. 53, is. 1-2, pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.newar.2009.02.001
4. MIMOUN, D., WIECZOREK, M. A., ALKALAI, L., BANNERDT, W. B., BARATOUX, D., BOUGERET, J.-L., BOULEY, S., CECCONI, B., FALCKE, H., FLOHRER, J., GARCIA, R. F., GRIMM, R., GROTT, M., GURVITS, L., JAUMANN, R., JOHNSON, C. L., KNAPMEYER, M., KOBAYASHI, N., KONOVALENKO, A., LAWRENCE, D., LE FEUVRE, M., LOGNONNÉ, P., NEAL, C., OBERST, J., OLSEN, N., RÖTTGERING, H., SPOHN, T., VENNERSTROM, S., WOAN, G. and ZARKA, P., 2012. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.* vol. 33, is. 2-3, pp. 529–585. DOI: 10.1007/s10686-011-9252-3
5. ZARKA, P., BOUGERET, J.-L., BRIAND, C., CECCONI, B., FALCKE, H., GIRARD, J., GRIEBMEIER, J.-M., HESS, S., KLEIN-WOLT, M., KONOVALENKO, A., LAMY, L., MIMOUN, D. and AMINAEI, A., 2012. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planetary Space Sci.* vol. 74, is. 1, pp. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
6. STANISLAVSKY, A. A., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., ZAKHARENKO, V. V., SHKURATOV, YU. G., TOKARSKY, P. L., YATSKIV, YA. S., BRAZHENKO, A. I., FRANTSUZENKO, A. V., DOROVSKYY, V. V., RUCKER, H. O. and ZARKA, P., 2018. Solar bursts as can be observed from the lunar farside with a single antenna at very low frequencies. *Astron. Nachr.* vol. 339, is. 7-8, pp. 559–570. DOI: 10.1002/asna.201813522
7. 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., LI-SACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KRISTENKO, 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. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
8. KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2003. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 16, is. 3, pp. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
9. FALKOVICH, I. S., KONOVALENKO, A. A., GRIDIN, A. A., SODIN, L. G., BUBNOV, I. N., KALINICHENKO, N. N., RASHKOVSKII, S. L., MUKHA, D. V. and TOKARSKY, P. L., 2011. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* vol. 32, is. 2, pp. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
10. STANISLAVSKY, A. A., BUBNOV, I. N., KONOVALENKO, A. A., GRIDIN, A. A., SHEVCHENKO, V. V., STANISLAVSKY, L. A., MUKHA, D. V. and KOVAL, A. A., 2014. First radio astronomy examination of the low-frequency broadband active antenna subarray. *Adv. Astron.* vol. 2014, id. 517058. DOI: 10.1155/2014/517058
11. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A. and YERIN, S. N., 2017. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 65, is. 9, pp. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238
12. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N. and BUBNOV, I. N., 2019. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part I: Design and Theoretical Model. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 67, is. 12, pp. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841
13. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N. and BUBNOV, I. N., 2016. Sensitivity of Active Phased Antenna Array Element of GURT Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 1, pp. 48–57. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.01.048
14. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A. and YERIN, S. N., 2015. Analysis of Active Phased Antenna Array Parameters for the GURT Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 20, no. 2, pp. 142–153. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra20.02.142
15. CANE, H. V., 1979. Spectra of the non-thermal radio radiation from the galactic polar regions. *Mon. Not. R. Astr.*

- tron. Soc.* vol. 189, is. 3, pp. 465–478. DOI: 10.1093/mnras/189.3.465
16. DULK, G. A., ERICKSON, W. C., MANNING, R. and BOUGERET, J.-L., 2001. Calibration of low-frequency radio telescopes using the galactic background radiation. *Astron. Astrophys.* vol. 365, no. 2, pp. 294–300. DOI: 10.1051/0004-6361:20000006
17. DURIC, N., THEODOROU, A., SMITH, K., ZOUAOU, G., HARRIS, M., JUNOR, W. and GAUSSIRAN, T., 2003. *RFI report for the U.S. South-West* [online]. [viewed 11 July 2021]. Available from ftp://gemini.haystack.edu/pub/lofar/siting_docs/SWUS_RFI.doc
18. KRAUS, J. D., 1966. *Radio Astronomy*. New York: McGraw-Hill.
19. WROBEL, J. M. and WALKER, R. C., 1999. Sensitivity. In: G. B. TAYLOR, C. L. CARILLI, and R. A. PERLEY, eds. *Synthesis imaging in radio astronomy II, ASP Conference Series*. vol. 180, pp. 171–179.
20. HICKS, B. C., PARAVASTU-DALAL, N., STEWART, K. P., ERICKSON, W. C., RAY, P. S., KASIM, N. E., BURNS, S., CLARKE, T., SCHMITT, H., CRAIG, J., HARTMAN, J. and WEILER, K. W., 2012. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* vol. 124, no. 920, pp. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121
21. KOROLEV, A. M., 2014. PHEMTs as Circuit Elements for Low-Power-Consumption Receivers/Amplifiers Operating in a Wide Temperature Range Environment. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 2, pp. 181–185. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra19.02.181
22. 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., VASYLKIVSKYI, 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. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
23. FOX, K. and TRAN, L., 2020. *New Sunspots Potentially Herald Increased Solar Activity* [online]. NASA: Space Weather. [viewed 13 July 2021]. Available from: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/new-sunspots-herald-increased-solar-activity-cycle-sdo>
24. SPACEWEATHERLIVE, 2020. *Real-time auroral and solar activity* [online]. [viewed 13 July 2021]. Available from: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/region/12765>
25. ZHELEZNYAKOV, V. V., 1970. *Radio Emission of the Sun and Planets*. Oxford: Pergamon Press.
- I. N. Bubnov, O. O. Konovalenko, P. L. Tokarsky, O. M. Korolev, S. M. Yerin, and L. O. Stanislavsky
Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- CREATION AND APPROBATION
OF A LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY
ANTENNA FOR STUDYING OBJECTS
OF THE UNIVERSE FROM THE FAR SIDE
OF THE MOON
- Purpose:* Theoretical and experimental studies of the active antenna – an element of the low-frequency radio telescope antenna array for the future observatory on the farside of the Moon.
- Design/methodology/approach:* To study the active antenna, consisting of a complex-shaped dipole and a low-noise amplifier, we used its mathematical model in the form of a two-port network, whose electrical parameters are set by the scattering matrix, the noise parameters being set by the covariance matrix of the spectral densities of noise waves. This model allows making the correct analysis of the signal-to-noise ratio at the active antenna output with account for the external and internal noise sources. The modelling results were compared with those of experimental measurements of antenna characteristics. A series of radio astronomy observations were made with the developed antenna under the Earth environmental conditions.
- Findings:* A numerical analysis of the radio telescope active antenna parameters has been made in a wide frequency range of 4–40 MHz. Two versions of the low-noise amplifier were developed to operate in the active antenna under the space and Earth environmental conditions. Under the Earth conditions, it has been experimentally proven that the range of problems, which such radio telescopes can effectively solve at low frequencies, is quite wide – from the solar research to the search for cosmological effects.
- Conclusions:* The results of numerical simulations and experimental measurements obtained in this work have shown a satisfactory agreement between them for the most of the frequency range. The results of this work can be useful in the research and development of active antennas designed for operation at the decameter and hectometer wavelength ranges, particularly those intended for using under the space environmental conditions.
- Key words:* active antenna, Moon, radio astronomy observations, sensitivity

Стаття надійшла до редакції 24.05.2021