

УДК 523.164:42
Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
РАДІОАСТРОНОМІЧНИЙ ІНСТИТУТ
(РІ НАНУ)
61002, г. Харків - 2, вул. Мистецтв, 4
тел. (057) 706-14-15

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор РІ НАНУ

_____ В.В. Захаренко

М.П.

« 05 » грудня 2018 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об'єктів Всесвіту з поверхні Місяця. Етап 1: “Аналіз, моделювання та тестування компонентів і в цілому активного антенного елемента місячного радіотелескопу” (шифр “Селена”)

відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018-2022 рр.» та розпорядження Президії НАН України від 07.02.2018 № 75.

Науковий керівник НДР
провідний науковий співробітник, д.ф.-м.н., с.н.с.

_____ О.О. Станіславський

Харків – 2018

Результати роботи розглянуто Вченою Радою РІ НАНУ,
Протокол №17 від 05 грудня 2018 р.

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

НДР “Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об'єктів Всесвіту з поверхні Місяця. Етап 1: «Аналіз, моделювання та тестування компонентів і в цілому активного антенного елемента місячного радіотелескопу» ” (шифр “Селена”)

Керівник НДР, п.н.с. д. фіз.-мат. наук	О.О. Станіславський	
Відповідальний виконавець, п.н.с., д. фіз.-мат. наук	Ю.Г. Шкуратов	
Директор РІ НАНУ, д. фіз.-мат. наук	В.В. Захаренко	
Зам. директора, д. фіз.-мат. наук	О.О. Коноваленко	
завідуючий відділом, д. фіз.-мат. наук	М.М. Калініченко	
завідуючий відділом, д. фіз.-мат. наук	О.М. Ульянов	
п.н.с., д. фіз.-мат. наук	Р.І. Костик	
п.н.с., д. фіз.-мат. наук	Н.Г. Щукіна	
завідуючий відділом, канд. фіз.-мат. наук	А.І. Браженко	
с.н.с., канд. фіз.-мат. наук	О.О. Литвиненко	
с.н.с., канд. фіз.-мат. наук	І.М. Бубнов	
с.н.с., канд. фіз.-мат. наук	О.М. Резниченко	
с.н.с., канд. тех. наук	В.М. Лісаченко	
с.н.с., канд. тех. наук	В.В. Борцов	
н.с.	С.В. Степкін	
н.с.	М.А. Сидорчук	
м.н.с.	С.М. Єрін	

Підписи виконавців НДР завіряю
Вчений секретар РІ НАНУ,
к.ф.-м.н

Антоненко Ю.В.

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1 Параметри активної антени над місячним ґрунтом	5
Розділ 2. Сонячні сплески, які можливо спостерігати із зворотного боку Місяця	14
Висновки	21
Перелік посилань	22
Публікації за темою	23

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

МШП	- малошумливий підсилювач;
SEFD	- system equivalent flux density;
SND	- Sky Noise Dominance;
DSP	- digital spectral processor;
АЦП	- аналого-цифровий перетворювач;
ГУРТ	- Гігантський Український Радіотелескоп
ДП	- дрейфуючи пари.

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 18 с + 5 службових сторінок (титул, зміст, публікації та інше), 17 рис.

Об'єкт дослідження – Сонце, Місяц, Всесвіт, радіоастрономічні прилади.

Мета роботи: Створення радіоастрономічних елементів і систем для низькочастотних досліджень радіовипромінювання Сонця, міжпланетного середовища, планет, пульсарів, залишків спалахів наднових та інше на зворотному боці поверхні Місяця разом з найбільшими в світі модернізованими низькочастотними українськими радіотелескопами УТР-2, УРАН, ГУРТ, а також з космічними місіями СТЕРЕО, ВИНД, Джуно і Солар Орбитер.

На цьому етапі отримано наступні основні результати:

- Були виконані числові розрахунки параметрів хрестоподібного антенного диполя для місячного радіотелескопу. Встановлено, що збільшення розмірів диполя помітно покращує більшість параметрів цієї активної антени, в тому числі його чутливість у радіоспостереженнях Всесвіту в смузі частот 1-40 МГц.
- За допомогою наземних спостережень поблизу частоти іоносферного відсічення показана ефективність майбутніх сонячних спостережень подібним радіоастрономічним інструментом на зворотному боці Місяця.
- Встановлені типи сонячні сплесків, які очікується спостерігати нижче 10 МГц за допомогою місячної обсерваторії.

(ключові слова) Сонце, Місяц, дрейфуючі пари, радіоастрономічні прилади

ВСТУП

Низькочастотна радіоастрономія на зворотному боці Місяця має декілька важливих переваг перед наземними спостереженнями. Основними з них є практично відсутність іоносфери, що дозволяю досліджувати радіовипромінювання з частотами нижче 10-15 МГц, а також відсутність у частотному діапазоні нижче 30 МГц сильного електромагнітного забруднення внаслідок техногенної діяльності (радіомовлення, телекомунікації) та природних блискавок. Але дослідження цієї частини радіочастотного спектра викликає великий інтерес. Тут слід згадати такі явища, як викиди корональної маси (СМЕ), сонячні радіосплески, планетарне радіовипромінювання, випромінювання екзопланет та багато іншого. Відкривши нове радіоастрономічне вікно, можна очікувати цікаві відкриття, як передбачувані, так і несподівані. Попередні дослідження в цієї сфері, здаються, дуже корисні. Це накладає певні вимоги при побудові низькочастотного радіотелескопа на поверхні Місяця. Перш ніж розгортати і підтримувати будь-яку антену на поверхні Місяця, для неї слід обрати дизайн, надаючи перевагу як решітки простих антен, так і високої якості самих окремих антен. Метою роботи є створення радіоастрономічних елементів і систем для низькочастотних досліджень радіовипромінювання Сонця, міжпланетного середовища, планет, пульсарів, залишків спалахів наднових та інше на зворотному боці поверхні Місяця разом з найбільшими в світі модернізованими низькочастотними українськими радіотелескопами УТР-2, УРАН, ГУРТ, а також з космічними місіями СТЕРЕО, ВИНД, Джуно, Солар Орбiter та інші. Це дозволить зробити унікальні спостереження дальнього космосу, які неможливі з поверхні Землі або навіть зі сторони Місяця, зверненої до Землі.

РОЗДІЛ 1. ПАРАМЕТРИ АКТИВНОЇ АНТЕНИ НАД МІСЯЧНИМ ГРУНТОМ

Перш за все в роботі досліджувалася чутливість дипольної активної антени для оцінки можливості її використання як сенсора радіотелескопу, призначеного для роботи в діапазоні частот 1–40 МГц на зворотному боці Місяця. Антена має хрестоподібну конструкцію (рис.1, а), що складається з двох ідентичних взаємно–ортогональних симетричних диполів складної форми (рис.1, б), закріплених на спільній стійці. До клем диполів підключені ідентичні малощумливі підсилювача (МШП), з виходів яких знімаються прийняті сигнали, що переносяться електромагнітними хвилями двох взаємно–ортогональних лінійних поляризацій. Дана антена використовується як елемент фазированной антеної решітки радіотелескопу ГУРТ і показала високу чутливість в

діапазоні частот з перекриттям в декаду (8–80 МГц), що дає надію на можливість її застосування як елемента місячного радіотелескопа.

Довжини плечей диполів вздовж середньої лінії ABC (рис.1, б) складають 1,4 м, кут нахилу до горизонту $\gamma = 45^\circ$, а клеми диполів розташовані на висоті $h = 1,6$ м над поверхнею ґрунту. Диполь виготовлений з тонкостінних мідних трубок діаметром 12 мм, вкритих тонким шаром поліетилену. Номінальний коефіцієнт підсилення МШП $G \approx 24$ дБ, ефективна шумова температура – близько 100К, а коефіцієнт нелінійних спотворень IP3 ~ 30 dBm.

Основним показником якості радіотелескопу є його чутливість, яка зазвичай оцінюється, мінімальною густиною потоку, яку він здатний виявити. Для антени з одною поляризацією вона визначається як [1, 2]

$$\Delta S_{\min} = \frac{2k_B T_{\gamma \text{ sys}}}{A_{e\gamma} \sqrt{\Delta f \tau n}} = \frac{SEFD}{\sqrt{\Delta f \tau n}}, \quad (1)$$

де Δf – смуга пропускання приймача, τ – час інтегрування після детектора, n – число записів; що усереднюються; *SEFD* (system equivalent flux density) – системна еквівалентна густина потоку [3]

$$SEFD = \frac{2k_B T_{\gamma \text{ sys}}}{A_{e\gamma}}; \quad (2)$$

$T_{\gamma \text{ sys}}$ – системна шумова температура на виході активної антени; $A_{e\gamma}$ – ефективна площа активної антени, віднесена до її виходу:

$$A_{e\gamma} = \kappa A_e \quad (3)$$

A_e – ефективна площа диполя згідно [4]; κ – коефіцієнт передачі активної антени, що складається з трьох множників:

$$\kappa = \eta_A \chi G_{\text{amp}}; \quad (4)$$

η_A – ККД диполя, що враховує втрати енергії в ґрунті; χ – коефіцієнт імпедансного узгодження між антеною та МШП (impedance mismatch factor); G_{amp} – номінальний коефіцієнт підсилення МШП за потужністю.

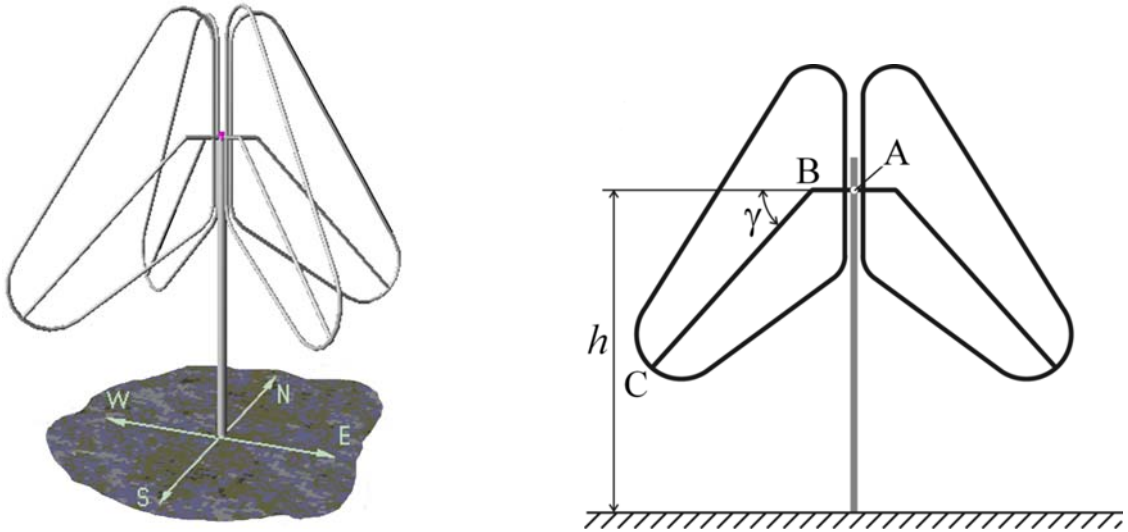


Рис.1. Конструкція диполя.

Теорія активної прийомної антени і методика визначення її параметрів докладно викладена в роботах [5, 6], з яких ми будемо брати у ході викладення необхідні нам співвідношення. Системна шумова температура $T_{\gamma sys}$ на виході активної антени складається з двох складових частин

$$T_{\gamma sys} = T_{\gamma ext} + T_{\gamma int} = T_{\gamma ext} \left(1 + \frac{T_{\gamma int}}{T_{\gamma ext}} \right) = \kappa T_B \left(1 + \frac{1}{SND} \right), \quad (5)$$

де $T_{\gamma ext}$ – зовнішня шумова температура на виході активної антени

$$T_{\gamma ext} = \kappa T_B, \quad (6)$$

що обумовлена прийомом антеною галактичного і позагалактичного випромінювання, який характеризується яскравісною температурою неба T_B ; $T_{\gamma int}$ – власна шумова температура на виході активної антени, джерелами якої є теплові втрати в матеріалі диполя і підстильному ґрунті, а також електронні шуми МШП; SND (Sky Noise Dominance [7]) – перевищення зовнішньої температури над внутрішньою

$$SND = \frac{T_{\gamma ext}}{T_{\gamma int}} = \frac{T_{e ext}}{T_{e int}}, \quad (7)$$

де $T_{e ext, int} = T_{\gamma ext, int} / G_{amp}$ – відповідні шумові температури активної антени, віднесені до входу МШП.

Підставляючи (3) і (5) в (1) і (2), ми маємо

$$SEFD = \frac{2k_B}{\kappa A_e} \kappa T_B \left(1 + \frac{1}{SND} \right) = \frac{2k_B T_B}{A_e} \left(1 + \frac{1}{SND} \right) \quad (8)$$

й

$$\Delta S_{min} = \frac{2k_B T_B}{A_e \sqrt{\Delta f m}} \left(1 + \frac{1}{SND} \right). \quad (9)$$

Якщо зовнішній шум значно перевершує власний шум на виході антени, чутливість даної антени буде максимально можливою, а ΔS_{min} й $SEFD$ будуть визначатися тільки ефективною площею диполя і яскравісною температурою неба:

$$SEFD^{sky} = \frac{2k_B T_B}{A_e}, \quad \Delta S_{min}^{sky} = \frac{2k_B T_B}{A_e \sqrt{\Delta f \tau}}. \quad (10)$$

Строго кажучи, величини $SEFD^{sky}$ і ΔS_{min}^{sky} в (10) відповідають нескінченно великим SND , який практично недосяжний. Тому вибирають значення $SND \geq 6$ дБ як компромісне [7], вважаючи при цьому, що ΔS_{min} нескладно довести до ΔS_{min}^{sky} , збільшивши час інтегрування τ на 57%.

Якщо SND недостатньо великий, щоб знехтувати власним шумом антени, для правильної оцінки чутливості необхідно знати значення значення $T_{\gamma ext}$ і $T_{\gamma int}$, що залежать від параметрів диполя, зокрема від його імпедансу Z_A і ККД η_A , які в свою чергу залежать від електричних параметрів місячного ґрунту.

Численні дослідження природного супутника Землі показують [8], що місячний ґрунт складається з шару реголіту 10 м завтовшки, що є хорошим діелектриком з параметрами $\epsilon_\gamma \approx 2,52$ і $\text{tg } \delta \approx 7 \cdot 10^{-3}$, який лежить на гранітному ґрунті з параметрами $\epsilon_\gamma \approx 5,12$ і $\text{tg } \delta \approx 9 \cdot 10^{-3}$. На жаль, ми не можемо точно оцінити вплив такого двошарового середовища на параметри нашого диполя, тому що не маємо відповідної програми, здатної виконати електродинамічне моделювання подібної структури. Однак ми можемо досить точно розрахувати параметри диполя у разі, коли ґрунт є однорідним, що дає нам можливість оцінити різницю між параметрами диполя, коли ґрунт є реголітом чи гранітом. На рис. 2 показані частотні залежності імпедансу диполя $Z_A = R_A + jX_A$ у діапазоні 1–40 МГц, а на рис. 3 частотні залежності його ККД для двох типів ґрунту. Розрахунку був виконаний за допомогою програми 4nec2X [9], яка базується на методі моментів [10] і добре зарекомендувала себе при моделюванні складних дротових антен.

Як видно з наведених рисунків розбіжність між параметрами диполя над різними ґрунтами, в принципі, не є великою. Реактивна частина імпедансу, яка фактично визначає коефіцієнт узгодженості χ в (4), практично не залежить від типу ґрунту. Є певні відмінності у ККД, які найпомітніші на частотах 4–5 МГц, але й вони не перевищують 3 дБ. Слід врахувати, що реальні частотні криві, що відображають залежності параметри диполя над двошаровим ґрунтом, будуть розташовані між наведеними кривими. На нижніх частотах, де товщина шару реголіту становитиме соті і десяті частки довжини хвилі, він буде слабо впливати на ККД диполя, тому реальна залежність ККД буде дуже близька до безперервної кривої. На частотах 20–40 МГц, де товщина шару реголіту

порівняння з довжиною хвилі, обидва середовища матимуть паритет, однак на цих частотах ККД диполя в обох випадках приблизно однаковий. Це дозволяє нам вважати, що місячний ґрунт в даній задачі можна вважати однорідним гранітом, оскільки це наближення не приведе до помітних помилок в розрахунках параметрів диполя. Всі подальші обчислення виконувалися з урахуванням цього припущення. Крім того, попередні розрахунки показали, що активна антена з диполем зазначених вище розмірів не в повній мірі задовольняв вимогам високої чутливості в заданій смузі частот, тому нижче представлені результати розрахунку активної антени з трьома варіантами диполів, перший з яких має зазначені вище розміри, а два інші масштабовані за розмірами по відношенню до першого з коефіцієнтами 1,5 і 2.

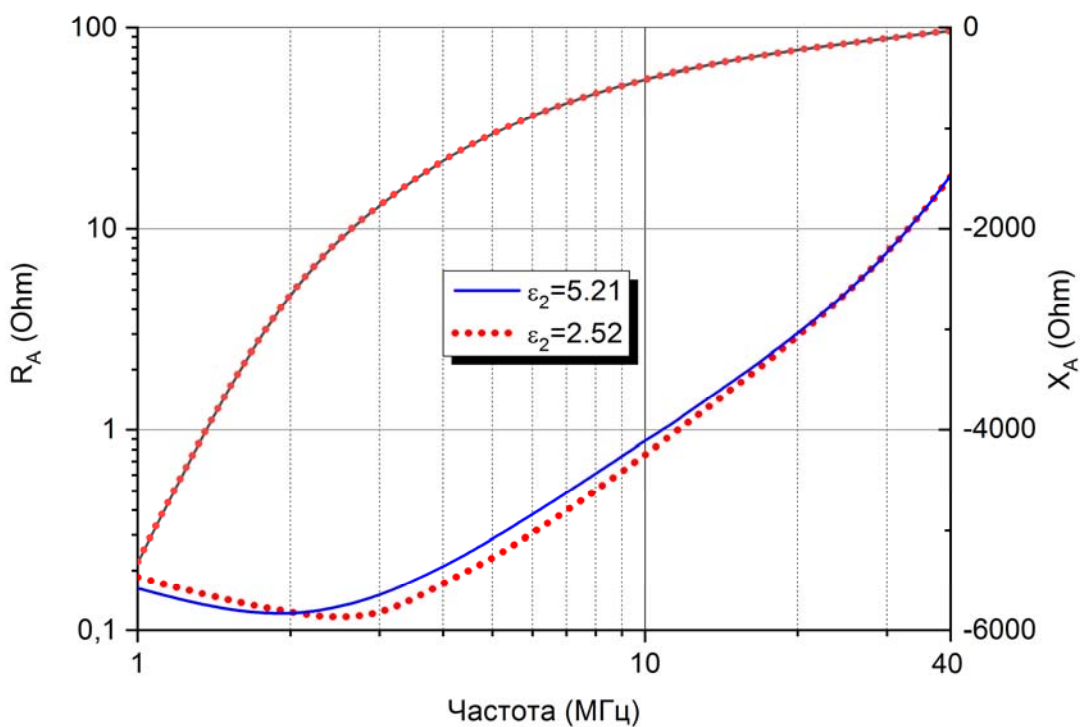


Рис.2. Залежність імпедансу диполя над різними ґрунтами від частоти.

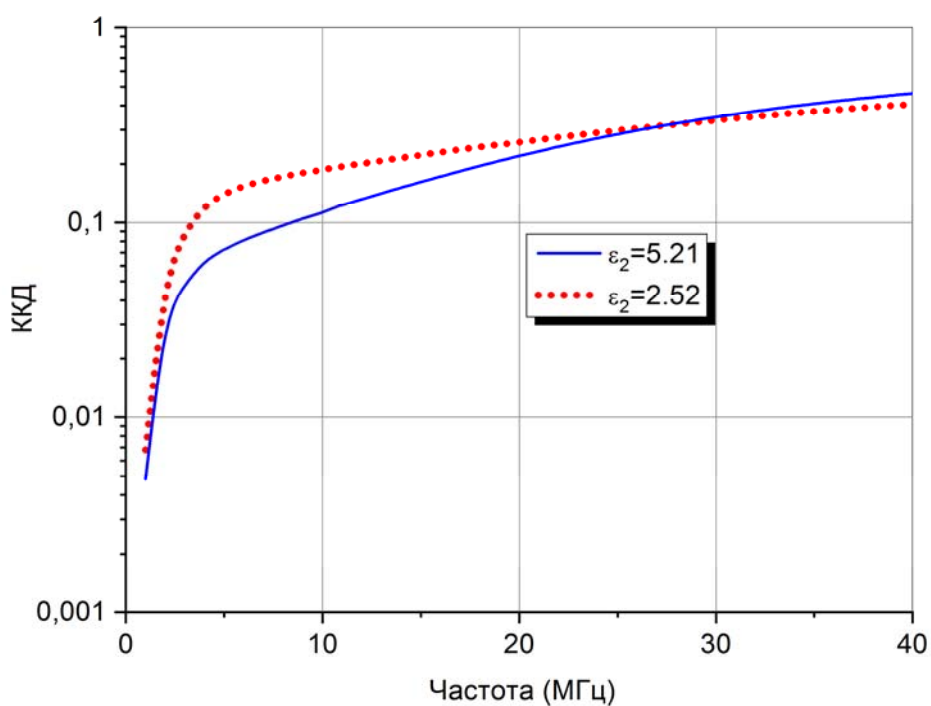


Рис.3. Залежність ККД диполя над різними ґрунтами від частоти.

На рис. 4 показані частотні залежності ефективної площі диполя $A_e(f)$ в напрямку максимуму головної пелюстки діаграми спрямованості, з яких випливає, що ефективна площа короткого диполя над ґрунтом практично не залежить від його розмірів.

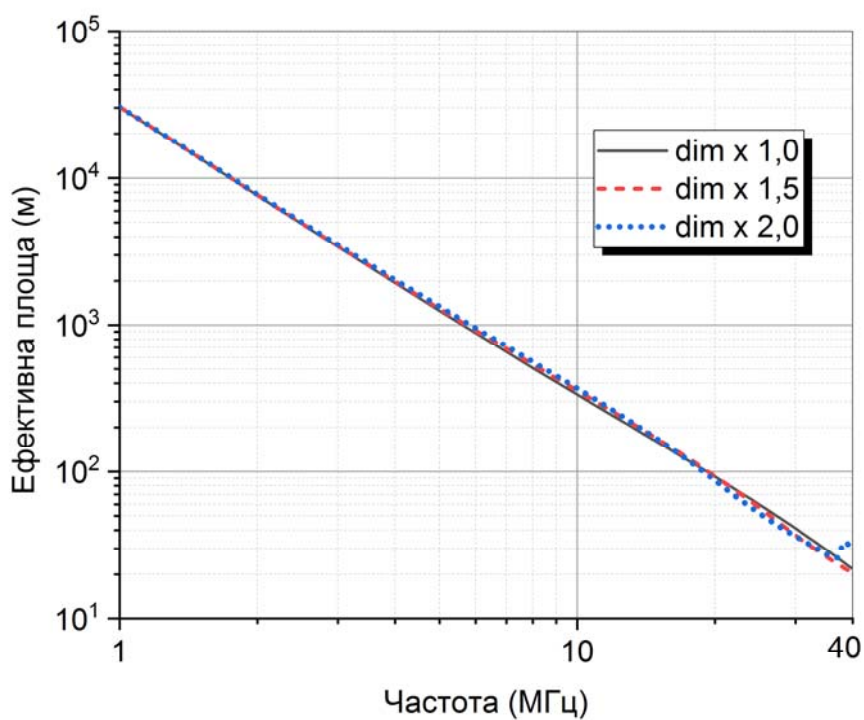


Рис.4. Залежність ефективної площі диполя від частоти.

На рис. 5 і рис. 6 показані ККД диполя і коефіцієнт імпедансної узгодженості між диполем і МШП як функції від частоти.

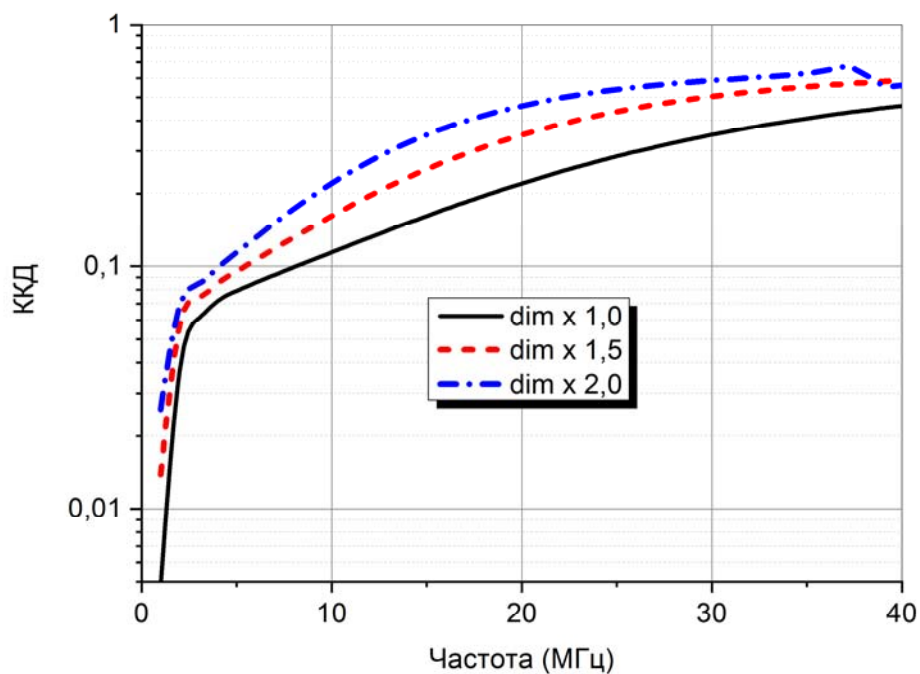


Рис.5. Залежність ККД диполя від частоти.

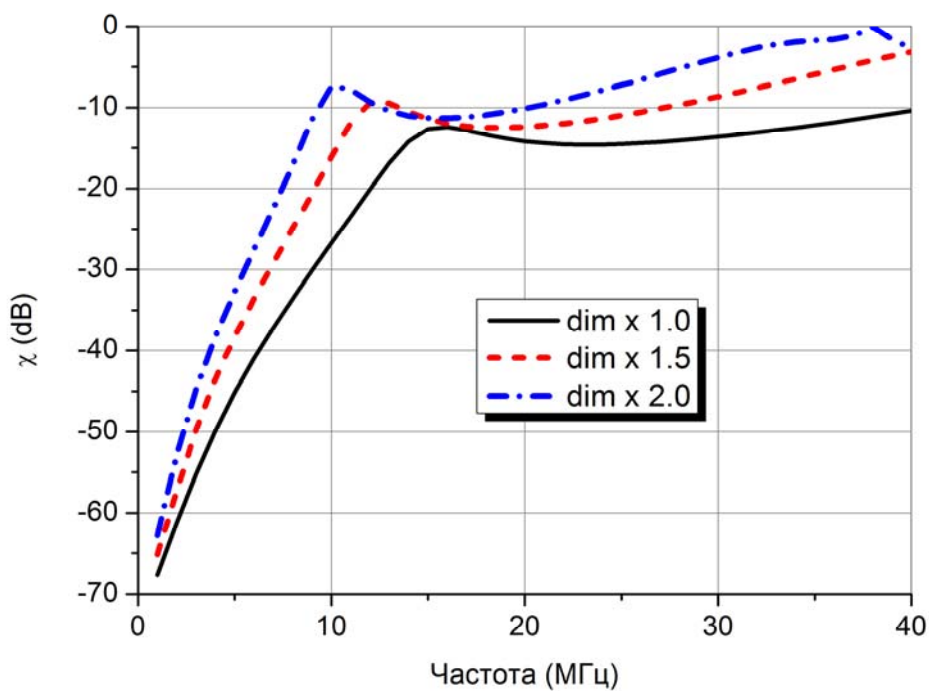


Рис.6. Залежність коефіцієнта імпедансного узгодження диполя і МШП від частоти.

На рис.7 і рис. 8 наведені частотні залежності ефективних зовнішньої і власної шумових температур активної антени від частоти.

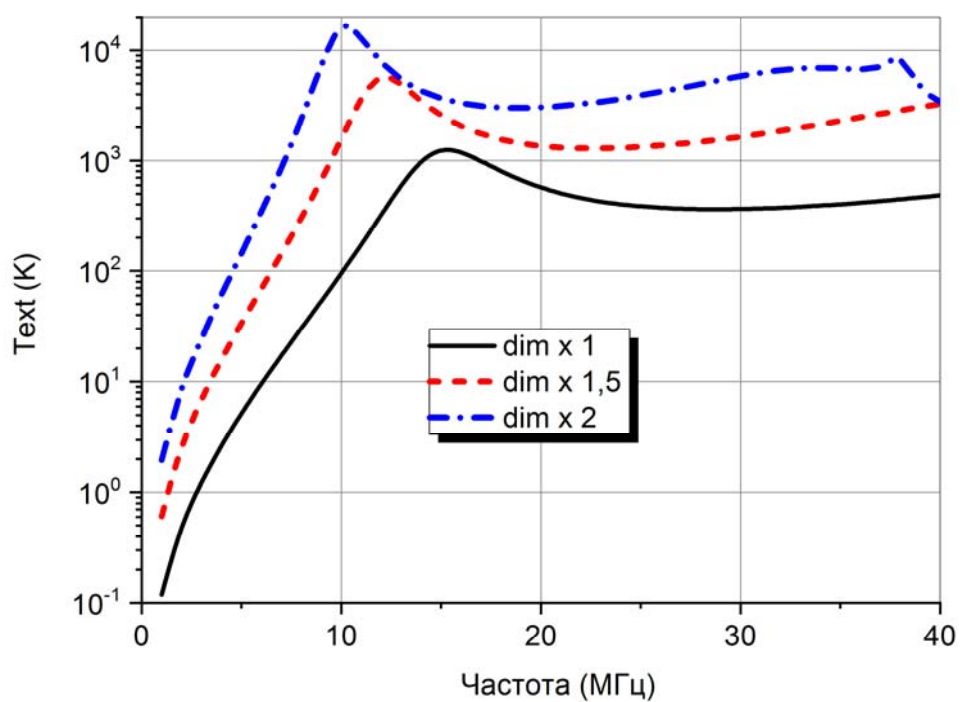


Рис.7. Залежність ефективної зовнішньої шумової температури активної антени від частоти.

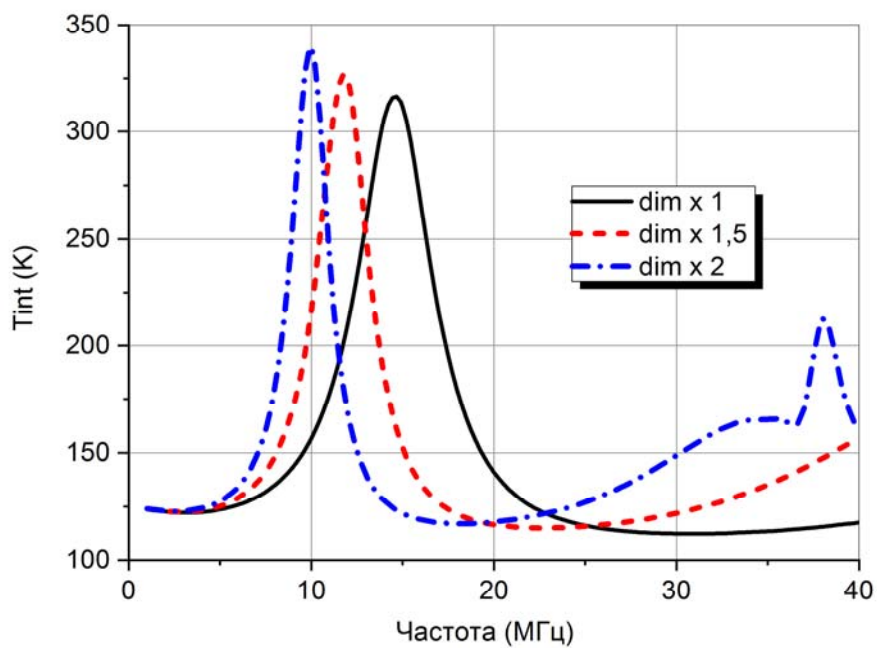


Рис.8. Залежність ефективної власної шумової температури активної антени від частоти

На рис. 9 приведена частотна залежність SND , яка свідчить, що збільшення розмірів диполя в два рази приводить до підвищення SND активної антени більш ніж на 10 дБ.

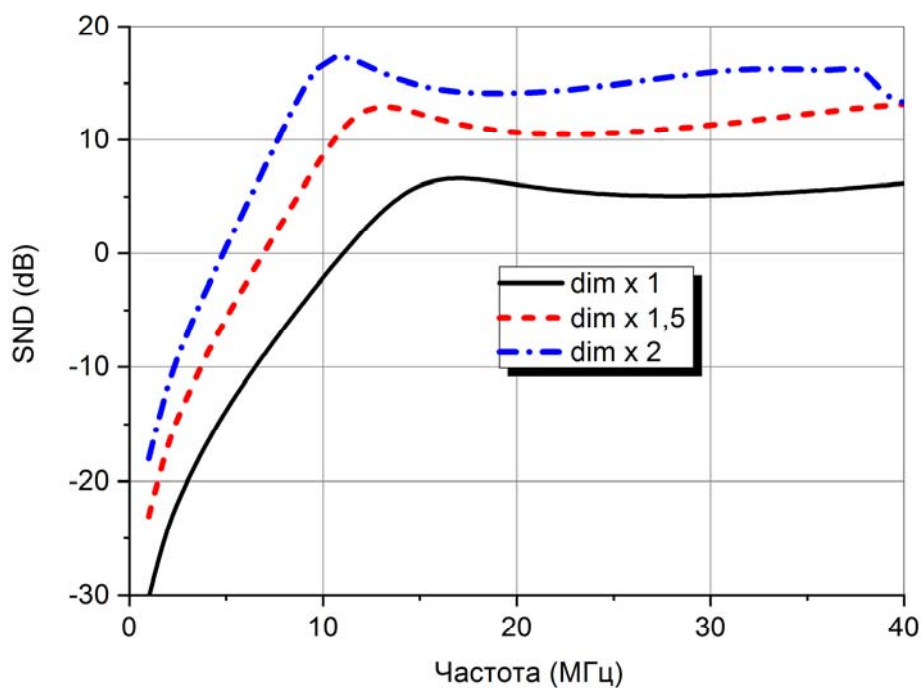


Рис.9. Залежність перевищення ефективної зовнішньої шумової температури активної антени над її власною шумовою температурою від частоти.

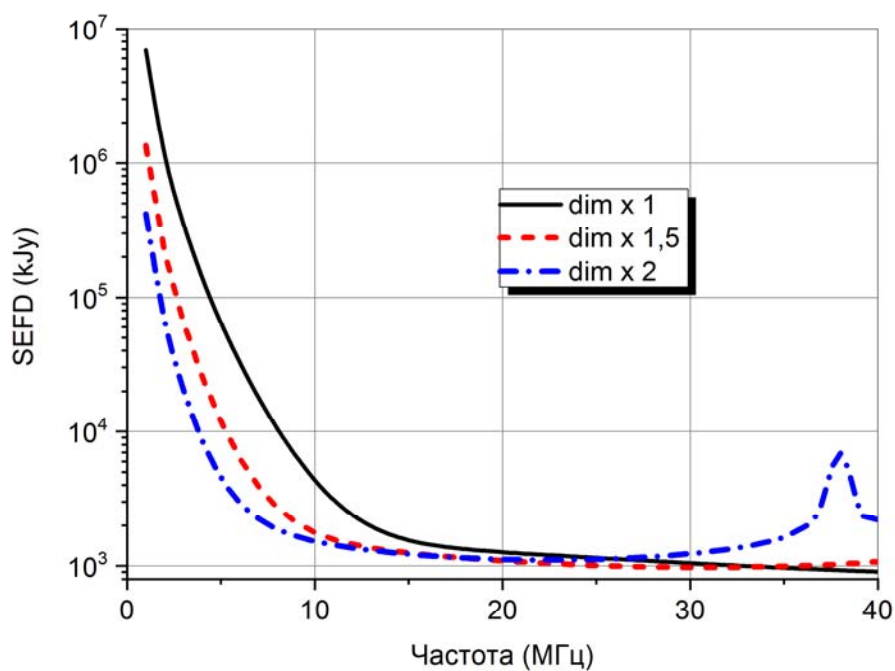


Рис.10. Залежність чутливості активної антени в термінах $SEFD$ від частоти.

Як і слід було очікувати з (7) – (8), збільшення SND активної антени призводить до збільшення її чутливості, яка виражається в зниженні SEFD (рис. 10). Особливо чітко ця тенденція помітна на частотах менших за 10 МГц, де SND активної антени з вихідним диполем менше за одиницю (менше ніж 0 дБ). Так на частотах 1–6 МГц спостерігається приблизно десятикратне зростання чутливості активної антени при дворазовому збільшенні розмірів диполя.

РОЗДІЛ 2. СОНЯЧНІ СПЛЕСКИ, ЯКІ МОЖЛИВО СПОСТЕРІГАТИ ІЗ ЗВОРОТНОГО БОКУ МІСЯЦЯ

В наші часи сонячні радіосплески типів II, III і IV спостерігаються нижче 10 МГц в супутникових експериментах над поверхнею плазмасфери. Успіх цих вимірювань пояснюється тим, що часто такі сплески дуже інтенсивні та досить тривалі у часі. Як показує багато наземних спостережень, різноманітність сонячних радіохвильових сплесків на низьких частотах набагато більше, і вони різняться за властивостями потоку та частоти. На жаль, можливості космічних апаратів не дають такої високої роздільної здатності за часом і частотою, як наземні інструменти. Крім того, чутливість низькочастотних антенних апаратів не є високою завдяки їх дуже простому дизайну [11]. Ось чому настільки цікаві спостереження сонячних сплесків з допомогою радіотелескопу, що буде розташований на зворотному боці Місяця і зможе проводити спостереження на наддовжніх хвилях.

Антенна є серцем кожного сучасного радіотелескопа, і будь-яка хороша антенна коштує дорого, особливо на Місяці (звичайно, з точки зору сучасних технологій). В ідеалі, така антенна повинна бути решіткою. Багатьом наземним радіорешіткам передували прототипи, що склалися з невеликої кількості антен, які були науково достатньо продуктивними. Тому радіотелескоп, який ґрунтується на окремій схрещеній активній антені, може служити відправною точкою для місячної радіоастрономної обсерваторії. Наші виміри на Землі показали, що антенна типу ГУРТ є дуже ефективним інструментом для радіоастрономічних досліджень на низьких частотах. Якщо змінити її розмір, то дипольна антенна буде працювати на частотах нижче 10 МГц без втрати якості. Така антенна дозволяє спостерігати ДП, сплески у поглинанні, S сплески, U-сплески, структури типу зебра, J-сплески та інші. Крім того, це не виключає дослідження більш загальних проблем радіоастрономії: низькочастотні мапи та моніторинг радіонеба, виявлення пульсарів, вимірювання червоного зсуву H_I, випромінювання планет-гігантів та тощо. За допомогою елемента антени ГУРТ на низьких частотах нам вже вдалося спостерігати річне зниження щільності потоку Кассіопеї А та радіовипромінювання з пульсара B0809+74.

Елемент антени ГУРТ для двох поляризацій складається з структури порожнистих металевих трубок та підсилювача антени, що робить його набагато простішим для налаштування та транспортування. У такому разі можна розробити парасолькову структуру телескопічних трубок, щоб розгорнути її на Місяці після транспортування в забудованому стані. Антенний підсилювач може бути розроблений у вигляді інтегральної схеми, що зменшить його вагу та енергоспоживання. Споживання підсилювача, що використовується в радіотелескопі ГУРТ, становить $180 \text{ мА} \times 12 \text{ В}$, але його можна легко зменшити до 60 мА , тому що є можливість зменшити динамічний діапазон. Враховуючи тихе радіооточення зворотнього боку Місяця, схрещений активний диполь з АЦП в 10-12 біт буде цілком достатній, щоб уникнути більшої частини інтермодуляційних радіоперешкод, що призводять до переповнення АЦП. Цифрові сигнали від двох (поляризаційних компонент) виходів схрещеної антени в діапазоні частот 20 МГц дають потік даних приблизно $800\text{-}960 \text{ Мбіт/с}$. Передача такого сигналу від Місячної радіообсерваторії до Землі через місячний супутник-ретранслятор є цілком досяжно. Потік даних сигналу може бути зменшений при тривалому накопиченні радіосигналу або шляхом здійснення онлайнного БПФ, як у DSPZ та ADR, якщо це необхідно.

Досвід проведення наземних спостережень поблизу іоносферного відсічення в присутності радіоперешкод дає корисну інформацію для майбутніх радіоастрономічних експериментів на Місяці. З цією метою ми провели спостереження слабких сплесків (наприкладі, так званих дрейфуючих пар, ДП) у липні 2017 році. У цьому спостережному сеансі сонячне радіовипромінювання приймалося радіотелескопами УТР-2, УРАН-2, однією з секцій ГУРТ, а також з однієї схрещеної дипольної антени, за допомогою цифрових приймачів/спектрометрів DSPZ та ADR, відповідно частотному діапазону ($8\text{-}32 \text{ МГц}$ або $8\text{-}80 \text{ МГц}$) з часовою роздільною здатністю 100 мс і високою частотною роздільною здатністю. Приклади спостережуваних ДП представлені в динамічних спектрах, що показані на рис. 11, 2 та 13. Слід зазначити, що незважаючи на їх відносно малу інтенсивність, сплески спостерігалися навіть за допомогою єдиної схрещеної дипольної антени. Це вказує на якість такої антени для радіоастрономічних спостережень. В той же час сплески типу ДП майже не спостерігалися на динамічних спектрах Nançay Decameter Array (найімовірніше, через недостатню часову роздільну здатність) і взагалі не були помітні в даних e-Callisto (через слабку чутливість інструментів), які виконували такі ж самі спостереження на частотах нижче 100 МГц .

Основною проблемою спостережень ДП з поверхні Місяця є визначення найнижчої межі частоти, на якій можна спостерігати такі сплески. Як добре відомо (напр., [12]), ДП виникають під час шторму сплесків III типу. Як правило, сплески III типу спостерігаються

від декілька гігагерців до десятків кілогерців. Це дозволяє нам припустити, що ДП можуть виникати на частотах нижче іоносферного відсічення Землі. На користь цього зауваження

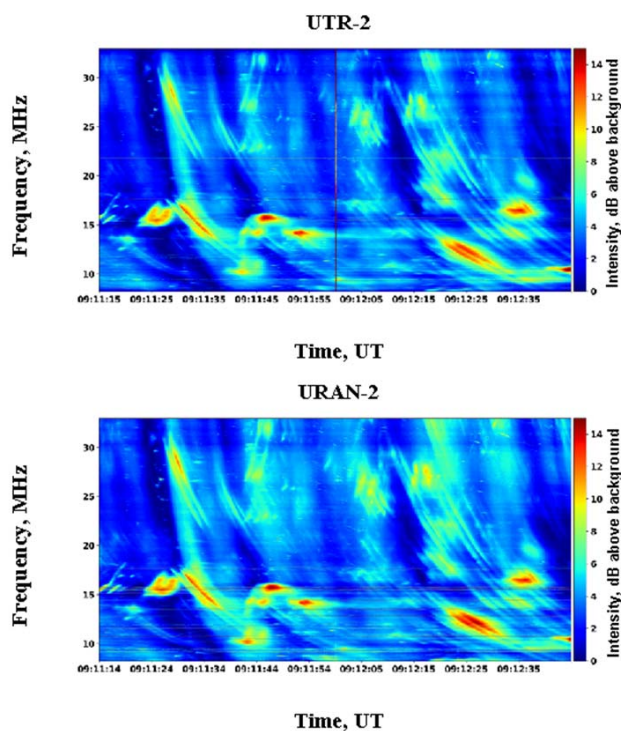


Рис.11. Динамічні спектри, що були отримані з решіток УТР-2 та УРАН-2.

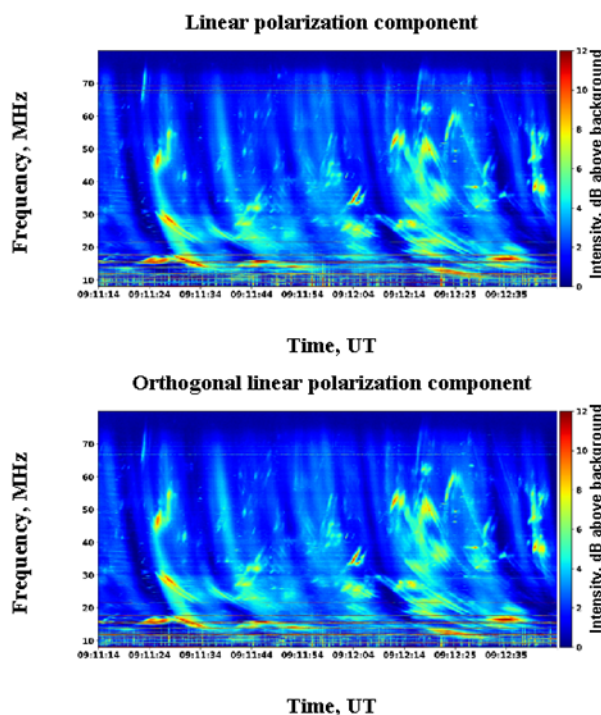


Рис. 12. Динамічні спектри показують, як багато ДП дрейфують по частоті. Горизонтальні яскраві лінії нижче 20 МГц та вище 65 МГц пов'язані з радіоперешкодами. Ці записи були отримані за допомогою субрешітки ГУРТ.

корисним вказує статистичний аналіз частот, на яких починається і закінчується кожна пряма ДП (або зворотна ДП). З цієї причини таке дослідження було виконано у роботі Станіславського та ін. [13], і це вказує на те, що прямі ДП можуть спостерігатися нижче частоти 10 МГц. Ці дослідження стосуються ДП, що спостерігалися 10-12 липня 2015 року. Щоб перевірити цей важливий результат більш детально, ми розглянули нашу вибірку ДП із спостережень 12 липня 2017 року.

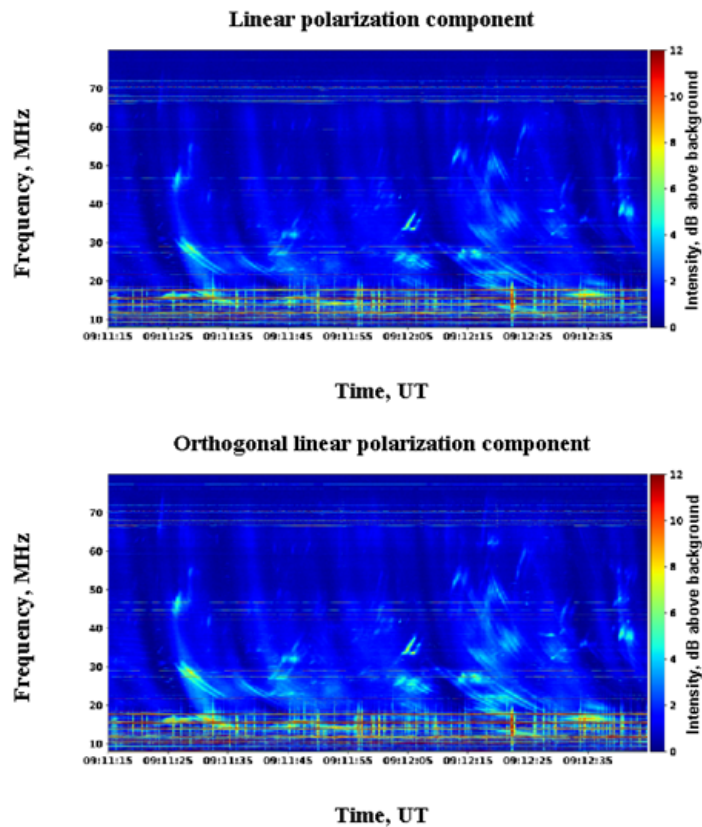


Рис. 13. Динамічні спектри, які одержані одним схрещеним диполем. Нагадаємо, що кожна субрешітка ГУРТ складається з таких диполів.

Отримані гістограми показані на Рис. 14. Як видно, в межах частот спостережень УТР-2 кількість прямих ДП зменшується на високих частотах, тоді як кількість зворотних ДП зменшується до нижчих частот. Ми намагаємося знайти їх розподіли за частотою статистичним чином, як це було зроблено Станіславським та ін. [13]. Дані включали 760 ДП сплесків, з яких 550 було прямих, а 210 – зворотних. Згідно з нашим розглядом, середня ширина частоти становила $3,31 \pm 1,58$ МГц для прямих ДП, тоді як для зворотних ДП це було $3,94 \pm 2,38$ МГц. Існує висока кореляція між початковими та кінцевими частотами у ДП (0,92 для прямих та 0,95 для зворотних). Це вказує на те, що початкові та кінцеві частоти пов'язані між собою. У зв'язку з цим слід зазначити, що дані містять викиди. Їх поява пов'язана з тим, що деякі ДП були обрізані у частоті вище та / або нижче через інструментальну здатність спостерігати сплески в діапазоні частот 8-32 МГц. Такі зразки

як би піддаються цензурі [14]. З іншого боку, частина ДП не спостерігалась, тому що вони повністю вийшли за межі діапазону частот UTR-2, і вони, здається, зрізані. Це помітно ускладнює аналіз статистичних властивостей ДП. Однак є підстави вважати, що випадкові величини f_{1F} і f_{2F} для прямих ДП (а також інша пара f_{1R} і f_{2R} для зворотних ДП) мають подібну імовірнісну функцію розподілу (іфр). Використання робастної підгонки дає менш відхилень по відношенню к методу найменших квадратів, і в такому разі ми маємо такі залежності

$$\begin{cases} f_{2F} = 1.19f_{1F} + e_F \\ f_{2R} = 1.09f_{1R} + e_R \end{cases} \quad (11)$$

де e_F та e_R – випадковий шум, f_1 – нижча частота, f_2 – верхня частота, а додаткові індекси F та R позначають набір сонячних сплесків (прямих або зворотних, відповідно).

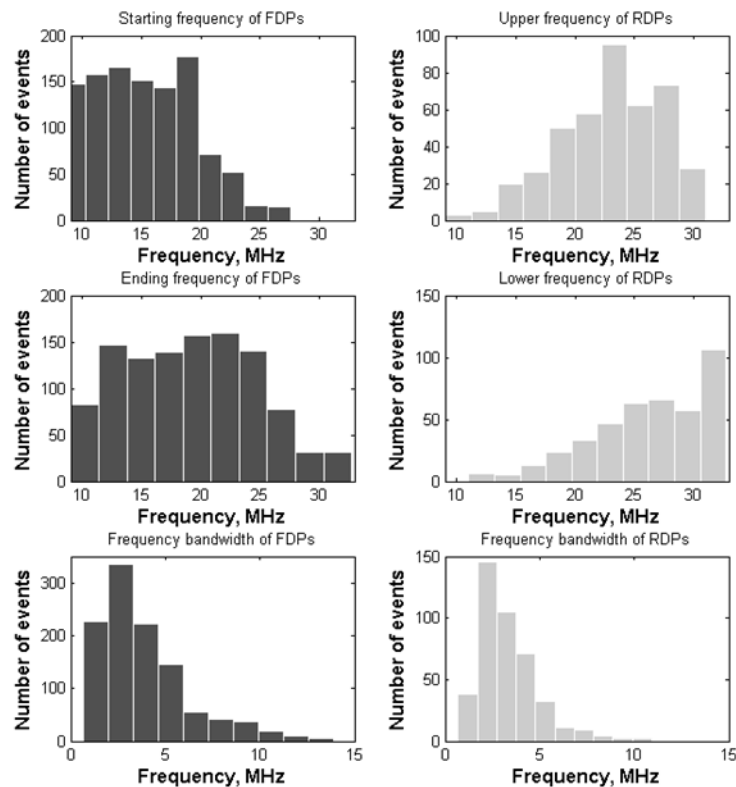


Рис. 14. Гістограми, що описують статистичні властивості прямих та зворотних ДП, які отримані в сонячних спостереженнях з допомогою UTR-2 12 липня 2017 року.

Відповідно виразам (11), бажано використовувати 3-параметрний гамма розподіл (тип Пірсона III) [15]. Використовуючи ці набори частот початку та кінця ДП, нашою наступною метою була оцінка відповідних параметрів гамма розподілу для прямих та зворотних подій. Метод моментів є одним із найпростіших підходів до оцінки параметрів. Завдяки аналізу гістограми прямих ДП з рис. 14, легко побачити (рис. 15), що існує

можливість спостерігати сплески нижче іоносферного відсічення. Щось схоже можна зробити і для зворотних ДП для більш високих частот. В такому разі, вони будуть помітні вище 32 МГц, і це підтверджується прямими спостереженнями за допомогою решітки ГУРТ. Простим підрахунком кількості ДП, що спостерігалися 12 липня на записах ГУРТ в межах 30-70 МГц (нижні і більш високі частоти були пошкоджені радіоперешкодами), ми виявили 2602 ДП, з яких 2178 подій були зворотні ДП, і 424 - це прямі. Слід зауважити також, що звичайно спостереження на УТР-2 проводились ± 3 години до і після полудня, тоді як антена ГУРТ дозволяє нам спостерігати сонячне випромінювання значне довше, починаючи від світанку до сутінків. Зокрема, ця особливість пояснює різницю в кількості ДП, що спостерігали УТР-2 і ГУРТ.

Відповідно до місцезнаходження прямих та зворотних ДП на частотній осі, прямі ДП більш переважно з'являються на менших частотах у порівнянні із зворотними ДП. Крім того, існує низькочастотний діапазон, де ймовірність появи прямих та зворотних ДП майже однакова. Над цими частотами переважають зворотні ДП, тоді як нижче домінує прямі ДП. Пік перетинання (20-25 МГц для 12 липня 2017 р.), що відповідає приблизно такому ж обсягу прямих і зворотних ДП, показаний на Рис. 16. Звернемо увагу, що ці висновки добре узгоджуються з результатами, отриманими в 2015 р. [13].

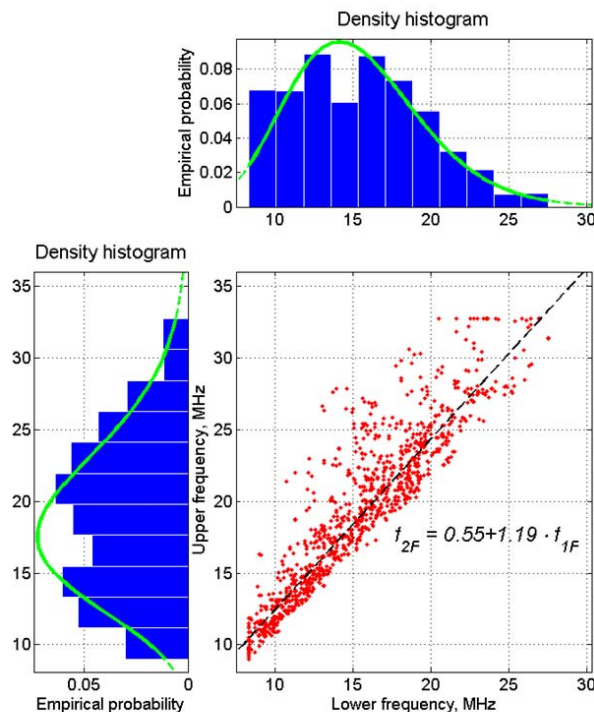


Рис. 15. Діаграма розкиду з одномірними нормалізованими гістограмами для верхніх та нижніх частот прямих ДП.

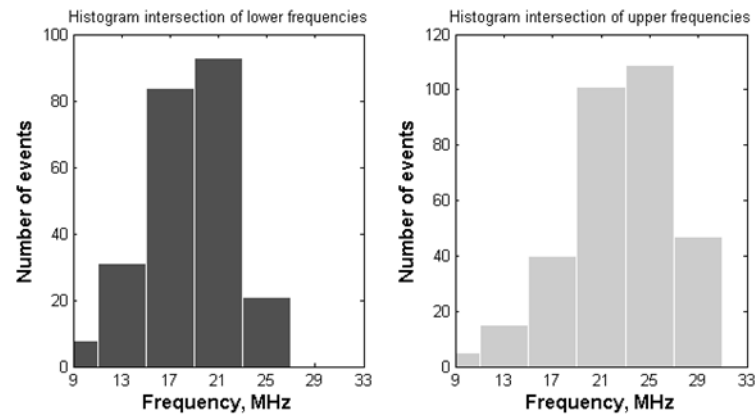


Рис. 16. Перехрестя гістограм, представлені на рисунку 14.

Для оцінки чутливості системи, яка складається з диполя GURT та цифрового приймача ADR ми точно врахували внутрішні та зовнішні шуми системи аналогічно тому, що наведено в попередньому розділі. Це дозволило визначити флуктуаційну чутливість, яка намальована на рис. 17. Цій малюнок показує, що ця чутливість досить велика для спостереження сонячні сплески, які є не дуже потужними. В нашому випадку мова йде про ДП. Таким чином, нам вдалося доказати можливість спостерігати ці сплески, як теоретично, так і завдяки реальним низькочастотним спостереженням радіовипромінювання Сонця у липні 2017 року.

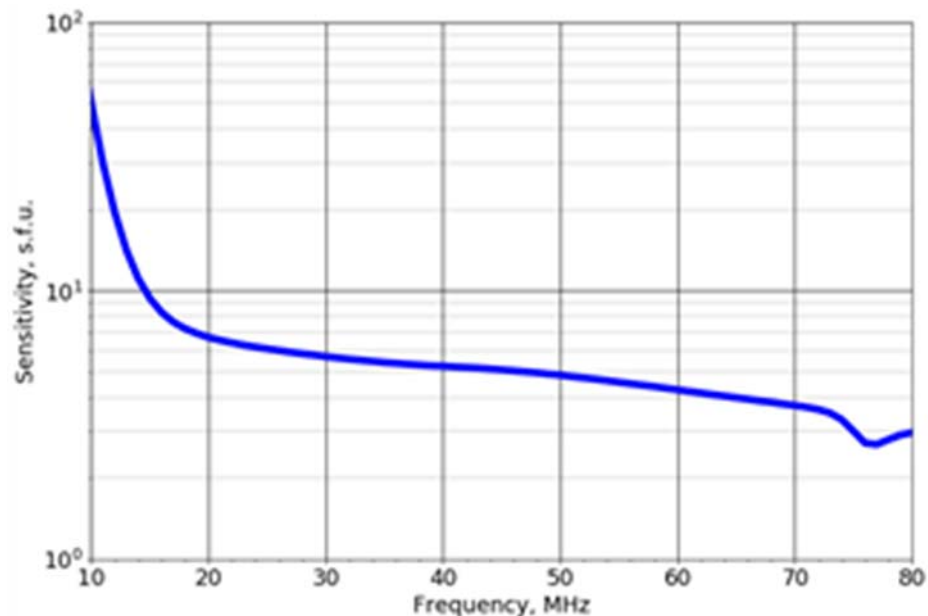


Рис. 17. Чутливість окремої активної антени GURT для інтервалів інтеграції у часі та частоті 100 мсек і 4,9 кГц, відповідно ($1 \text{ с.о.ш.} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$).

Таким чином, за допомогою наземних спостережень поблизу частоти іоносферного відсічення показана ефективність майбутніх сонячних спостережень подібним радіоастрономічним інструментом на зворотному боці Місяця.

ВИСНОВКИ

- Збільшення розмірів диполя помітно покращує більшість параметрів активної антени, в тому числі ККД диполя і коефіцієнт його узгодження з МШП, що приводить до підвищення зовнішньої шумової температури на її виході і збільшення SND.
- Разом з тим, на частотах вище 15 МГц, де SND перевищує 6 дБ, чутливість активної антени при збільшенні розмірів диполя практично не змінилася.
- Дворазове збільшення розмірів диполя дозволяє розширити смугу частот активної антени, що вимірюється за рівнем $SND = 6$ дБ, відсунувши її нижню межу з 15 МГц до 6,5 МГц.
- Сонячні ДП можуть бути виявлені не тільки антенними решітками, але навіть і одним активним диполем, таким як антенний елемент решітки ГУРТ. Це може бути вельми корисним для реалізації низькочастотних радіотелескопів на Місяці.
- Хрестоподібна активна антена добре працює в земних умовах, навіть поблизу частот, що перетинаються з частотою іоносферного відсічення. Існує повна впевненість, що цей інструмент дозволяє проводити ефективні радіоастрономічні спостереження на зворотному боці Місяця на дуже низьких частотах, якщо цей проект буде реалізований. Тим не менш, будь-яка субрешітка GURT є ефективним інструментом для наземних досліджень DP. Подібні решітки, що працюють разом, здатні суттєво перевершити можливості УТР-2, який використовується в сонячних спостереженнях, за своїми можливостями.
- Наш статистичний аналіз верхніх та нижніх частот, на яких відбуваються ДП, ясно вказує на те, що статистичні властивості прямих та зворотних ДП є подібними, а їхні піки імовірнісних функцій розподілу зрушені по частоті. Це пояснює, чому більшість зворотних ДП виявляються на верхніх частотах, тоді як прямі ДП віддають перевагу низьким частотам. Ці результати дозволяють з повною упевненістю очікувати можливість спостереження прямих ДП нижче 10 МГц.
- Отримані результати безперечно показують, що продовження фінансування даної роботи себе повністю виправдовує.

Перелік посилань:

1. Краус Д. Радиоастрономия. – М., «Сов. радио», 1973. – 456 с.
2. Коноваленко А. А. и др. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. – Радиофизика и радиоастрономия, 2016. – Т. 21, № 2. – С. 83–131.
3. Wrobel J.M., Walker R.C. Sensitivity // Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, G. B. Taylor, C. L. Carilli, and R.A. Perley, Eds., ASP Conference Series. – 1999. – Vol. 180. – pp. 171-186.
4. ДСТУ 3801-98 – Антени, терміни та визначення. – Київ, Держстандарт України, 1999.
5. Токарский П.Л., Коноваленко А.А., Ерин С.Н., Бубнов И.Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ // Радиофизика и радиоастрономия. – 2016. – Т. 21, № 1. – С.48-57.
6. Tokarsky P.L., Konovalenko A.A., Yerin S.N. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low Frequency Radio Telescope GURT. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol.65, No. 9. – pp.4636-4644.
7. Hicks B.C. *et al.* Active antenna system for long wavelength radio astronomy // Publications Astron. Soc. Pacific. – 2012. – Vol. 124, No. 920. – Pp. 1090–1104.
8. Heiken G. H., Vaniman D. T. French B. M. Lunar sourcebook – A user's guide to the moon // Cambridge University Press, 1991.
9. 4nec2 – NEC based antenna modeler and optimizer by Arie Voors. [Online]. Available from: <http://www.qsl.net/4nec2/>
10. Burke G.J., Poggio A.G. Numerical electromagnetic code (NEC) – Method of moments. Pt. I. Program description – Theory.” – Lawrence Livermore Nat. Lab., USA, Ca., Rep. UCID-18834; 1981.
11. Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Rucker H.O. et al. Antenna performance analysis for decameter solar radio observations // Astron. Nachr. – 2009. – Vol. 330. – pp. 691-697.
12. Møller-Pedersen B., Smith R.A., Mangeney A. A theory of a solar radio burst: The drift pair // Astron. Astrophys. – 1978. – Vol. 70. – pp. 801-813.
13. Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Volvach Ya. S., Frequency drift rate of solar decameter “drift pair” bursts // Res. Astron. Astrophys. – 2017. – Vol. 17, №9. – id. 097, 10 pp.
14. Cohen A.C., Truncated and Censored Samples: Theory and Applications. – Marcel Dekker, New York, 1991.
15. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N., Continuous Univariate Distributions, John Wiley and Sons. – New York, 1994.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО НДР “Селена” ЗА 2018 РІК.

В рамках даного проекту були представлені дві доповіді на міжнародних конференціях:

1. S. Yerin, A.A. Stanislavsky, I. Bubnov, A. Konovalenko, P. Tokarsky, V. Zakharenko, “Small-sized radio telescopes for monitoring and studies of solar radio emission at meter and decameter wavelengths”, Tenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Primorsko, Bulgaria, June 4-8, 2018.
2. О.О. Станіславський, О.О. Коноваленко, В.В. Захаренко, С.М. Єрін, І.М. Бубнов, П.Л. Токарський, Ю.Г. Шкуратов, В.В. Доровський, Я.С. Яцків, А.І. Браженко, А.В. Французенко, Ф. Зарка, Х.О. Рукер, “Можливості радіоспостережень сонячних сплесків на зворотному боці Місяця на дуже низьких частотах”, Дев'ята наукова конференція пам'яті Б.Т.Бабія «Вибрані питання астрономії та астрофізики», Львівський національний університет імені Івана Франка, 2-5 жовтня 2018 року.,

а також три статті опубліковані в журналах:

1. П.Л. Токарский, А.А. Коноваленко, С.Н. Ерин, И.Н. Бубнов, “Шумовая температура активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ”, Радиофизика и радиоастрономия, 2018, Т. 23, № 1, с. 43–59 <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.043>;
2. В.Г. Галушко, В.В. Виноградов, Ю.Г. Шкуратов, "Проект спутникового радара миллиметрового диапазона для дослідження поверхні Місяця", Радіофізика і радіоастрономія, 2018, Т. 23, № 3, с. 212–228 <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.212>;
3. A.A. Stanislavsky, A.A. Konovalenko, S.N. Yerin, I.N. Bubnov, V.V. Zakharenko, Yu.G. Shkuratov, P.L. Tokarsky, Ya.S. Yatskiv, A.I. Brazhenko, A.V. Frantsuzenko, V.V. Dorovsky, H.O. Rucker, Ph. Zarka, “Solar bursts as can be observed from the lunar farside with a single antenna at very low frequencies”, *Astronomische Nachrichten*, 2018, <https://doi.org/10.1002/asna.201813522> (у друці).