

<https://doi.org/10.15407/knit2021.03.066>
УДК 520.272.2: 621.396.677.494

В. П. ВЛАСЕНКО¹, заст. нач. центру космічних досліджень і зв'язку

ORCID ID: 0000-0001-8639-4415

E-mail: vlasenko.vp@gmail.com

В. М. МАМАРЕВ¹, нач. відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0003-2233-7432

E-mail: mamarev@spacescenter.gov.ua

В. В. ОЖІНСЬКИЙ¹, нач. центру космічних досліджень і зв'язку, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0003-0830-2428

E-mail: ozvic@ukr.net

О. М. УЛЬЯНОВ², зав. науково-дослідного відділу декаметрової радіоастрономії, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0003-0934-0952

E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

В. В. ЗАХАРЕНКО², директор, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-9977-824X

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

М. І. ПАЛАМАР³, зав. кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-8255-8491

E-mail: palamar.m.i@gmail.com

А. В. ЧАЙКОВСЬКИЙ³, доцент кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем, канд. техн. наук, доцент

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: chaikovskiy@gmail.com

¹ Національний центр управління та випробувань космічних засобів
вул. Московська 8, Київ, Україна, 01010

² Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України
вул. Мистецтв 4, Харків, Україна, 61002

³ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
вул. Руська 56, Тернопіль, Україна, 46001

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ПЕРВИННОЇ МАТРИЦІ ПОХИБОК РАДІОТЕЛЕСКОПА РТ-32 В АВТОМАТИЗОВАНОМУ РЕЖИМІ

2020 рік став роком введення в дослідну експлуатацію українського радіотелескопа нового покоління РТ-32. Отримані в ході дослідної експлуатації результати спостережень мазерних водневих та гідроксильних ліній підтвердили коректність розрахунків та правильність технологічних рішень консорціуму українських науковців та виробників. Одним з напрямків подальшого розвитку РТ-32 як інструмента радіоастрономічних досліджень є підвищення точності наведення радіотелескопа на радіоастрономічні джерела. Останнього передбачається досягти за рахунок автоматизації процесів формування матриць похибок наведення та їхньої інтеграції в ході виконання спостережень. Формування такої матриці перед-

Цитування: Власенко В. П., Мамарев В. М., Ожінський В. В., Ульянов О. М., Захаренко В. В., Паламар М. І., Чайковський А. В. Методика побудови первинної матриці похибок радіотелескопа РТ-32 в автоматизованому режимі. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 3 (130). С. 66—75. <https://doi.org/10.15407/knit2021.03.066>

бачає врахування конструктивних особливостей антенної системи та метеоумов. В роботі представлено результати геодезичних вимірювань поверхні антенної системи на різних кутах місця, побудови 3D-моделі рефлектора. Запропоновано методику побудови матриці похибок, яка на даному етапі досліджень забезпечує необхідну простоту сприйняття та інтерпретації людиною-оператором отриманих результатів. Наведено результати верифікації розробленої методики з використанням еталонних радіоджерел та отримані з її використанням матриці похибок наведення за кутом місця та азимуту розмірності 81×81 відлік. Впровадження в систему керування радіотелескопом представлених результатів дозволило підвищити точність наведення радіотелескопа РТ-32 в С- та К-діапазонах до значень порядку $36''$.

Ключові слова: радіотелескоп, матриця похибок наведення, антенна система, радіоджерела.

Інтенсивний розвиток телекомунікаційних технологій, пристроїв та систем наприкінці ХХ століття призвів до кардинального перегляду підходів до організації міжнародного зв'язку. Як наслідок, через несумірність витрат та отриманих результатів використання антенних систем великого діаметра для забезпечення космічним зв'язком поступово втрачає актуальність. З метою ефективного використання наявної інфраструктури провідними країнами світу реалізуються проекти зі створення радіотелескопів на базі таких антенних систем. Після цього новостворені інструменти залучаються до проведення радіоастрономічних досліджень.

Аналіз досвіду реалізації іноземних проєктів з модернізації антен типу BWG (Beam Wave-Guides), до яких належить і MARK-4B [3], доводить, що частота залучення до участі у наукових проєктах зумовлюється їхнього унікальністю. Остання може характеризуватися як місцем розташування, так і технічними характеристиками. Враховуючи зазначене та проведений у роботі [3] аналіз отриманих в результаті модернізації характеристик іноземних радіотелескопів, консорціум українських наукових та виробничих установ поставив амбітне завдання зі створення мультидіапазонного широкопосмугового радіотелескопа РТ-32 на базі антенної системи MARK-4B.

Відповідно до вимог замовника проєкту одним з важливих параметрів новоствореного радіотелескопа має стати висока точність наведення. Досягнення максимально можливих її значень має бути забезпечене модернізацією системи управління антенною системою MARK-4B та розробкою методів автоматизованого формування матриці похибок наведення.

Метою статті є висвітлення результатів наукових досліджень з розробки методики побу-

дови матриці похибок наведення радіотелескопа РТ-32 та підходів до її автоматизації.

ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС ДОСЛІДЖЕННЯ

Сумарна похибка наведення антенної системи Δ_{Σ} є функцією трьох похибок:

$$\Delta_{\Sigma} = f(\Delta_{ref}, \Delta_{emec}, \Delta_{mod}),$$

де Δ_{ref} — похибка відхилення рефлекторів антенної системи від ідеального (розрахункового тіла обертання) в нормальних умовах (оскільки відношення діаметра основного рефлектора до діаметра субрефлектора дорівнює 10, то в першому наближенні для оцінювання відповідної складової похибок в поточному дослідженні враховувались тільки відхилення форми від модельної поверхні для основного рефлектора); Δ_{emec} — похибка від електричної та механічної частин приводів антенної системи (складаються з похибок, які вносять елементи системи керування такі як електродвигуни, сервоперетворювачі, муфти, шестерні тощо); Δ_{mod} — похибки моделей наведення антенної системи.

Об'єктивно, що серед перелічених похибок найбільший внесок у сумарну похибку має величина Δ_{emec} . Зокрема, похибка, яку вносять електрична та механічна частини з урахуванням поточних умов застосування антенної системи, дорівнює

$$\Delta_{emec} = f(\Delta_{elec}, \Delta_{mec}, p_{atm}, T_{air}, h_{air},$$

$$I_S, \vec{V}_{wind}, w_{mm}(q, k), f(El, Az)),$$

де Δ_{elec} — похибки, які вносить електрична частина, Δ_{mec} — похибки, які вносить механічна частина, p_{atm} — атмосферний тиск, T_{air} — температура навколишнього середовища, h_{air} — відносна вологість повітря, I_S — сонячне опромінення, \vec{V}_{wind} — вектор швидкості вітру, $w_{mm}(q, k)$ — кількість опадів на годину, q — мм води на годину, k — тип опадів, El — кут місця, Az — кут азимуту.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ ГОЛОВНОГО ДЗЕРКАЛА

На етапі проєктування антенної системи MARK-4В з метою підтвердження її характеристик лабораторія Массачусетського технологічного інституту [5] виконала математичне моделювання ідеалізованої конструкції з урахуванням деформування зовнішньої обшивки, підтримувальних балочних елементів та зміщення регулювальних болтів. Результати зазначеного конструктивного

аналізу підтвердили високу точність виконання дзеркала антени та прийнятну деформацію для її різних положень.

В результаті експлуатації антенної системи протягом 34 років втома матеріалів як самого дзеркала, так і блочних елементів могла призвести до появи інших деформацій. Тому з метою дослідження відхилень поверхні головного рефлектора антенної системи від проєктних значень на першому етапі розробки методики проведено сканування поверхні рефлектора при різних кутах нахилу з використанням тахеометра із функцією автоматичного сканування.

Сканування проводилось зліва направо та зверху вниз рівномірними галсами з різним кроком на кутах місця $El = 5^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, при постійних значеннях параметрів: $Az = -90^\circ$, $T_{air} = 20^\circ C$, $p_{atm} = 745$ мм рт. ст., $r_{air} = 50\%$, $I_S = 1080$ Вт/м², $V_{wind} = 0$, $w_{mm} = 0$.

За результатами обробки у програмному середовищі Matlab встановлено, що поверхня головного дзеркала, яка згідно із [5] має «спеціальну форму», є двопорожнинним гіперболоїдом з відповідною модельною точністю виконання дзеркала при нормальному вітровому навантаженні (рис. 1–3). Отримані результати повністю відповідають конструкторській документації [5] та попереднім результатам емпіричних досліджень [1–3, 6].

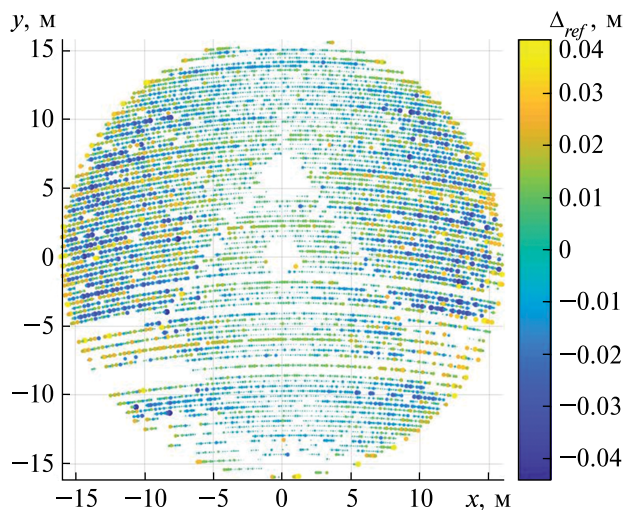


Рис. 1. Відхилення Δ_{ref} від ідеального гіперболоїда для $El = 5^\circ$

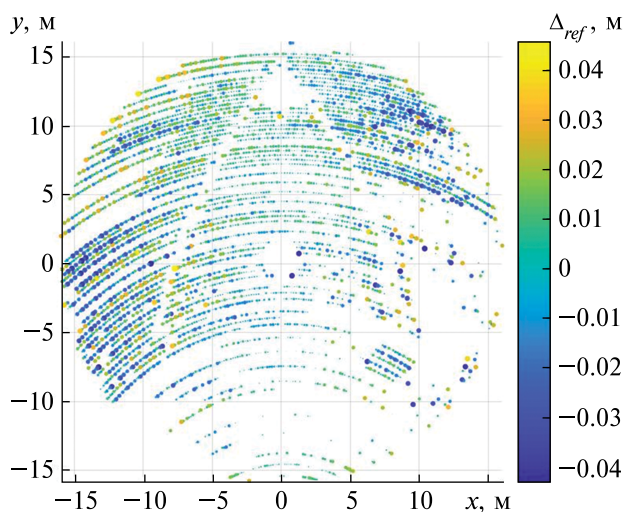


Рис. 2. Те ж для $El = 30^\circ$

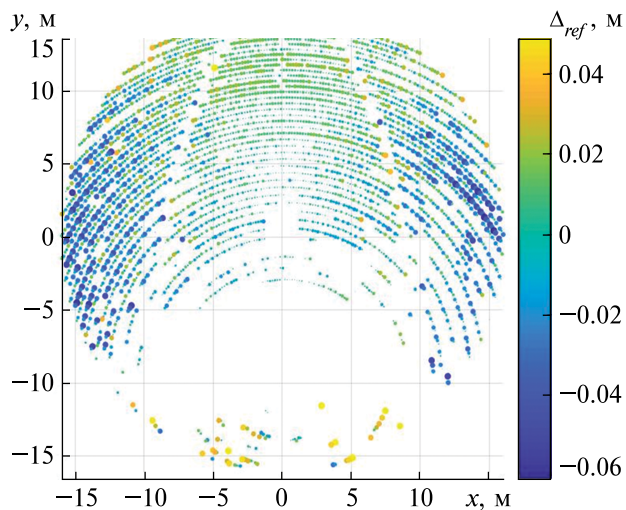


Рис. 3. Те ж для $El = 45^\circ$

На рис. 1—5 нуль системи координат лежить у центрі двопелюсткового гіперболоїда, одиниця вимірів величин по осях та похибок, наведених різними кольорами в легенді, приведено в метрах.

Методика та моделі оцінювання якості конструкції головного рефлектора та його навантаження за умов апіорної невизначеності з урахуванням метеоумов будуть представлені в наступних наукових працях. Аналіз вказав на наявність нерівномірної деформації рефлектора під дією сили тяжіння Землі (рис. 4—6), для різних кутів місця, що також підтверджено емпіричними дослідженнями [1—3, 6].

Як відомо [5], канонічне рівняння двопорожнинного гіперболоїда має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1.$$

В результаті опрацювання отриманих результатів, з врахуванням деформацій канонічне рівняння, яке описує поверхню головного рефлектора для різних кутів місця, при визначених в цій статті початкових умовах набуває таких виглядів:

при $El = 5^\circ$ —

$$\frac{x^2}{73.4366^2} + \frac{y^2}{73.4705^2} - \frac{z^2}{262.7038^2} = -1,$$

при $El = 30^\circ$ —

$$\frac{x^2}{62.8094^2} + \frac{y^2}{62.8736^2} - \frac{z^2}{192.8063^2} = -1,$$

при $El = 45^\circ$ —

$$\frac{x^2}{64.3684^2} + \frac{y^2}{64.4694^2} - \frac{z^2}{202.0497^2} = -1.$$

Аналіз канонічних рівнянь головного рефлектора показав, що вони є недостатньо точними через значний вплив $\Delta_{етес}$ на всіх кутах місця та Δ_{mod} при $El \in [45^\circ \dots 90^\circ]$.

На рис. 7 показано 3D-модель рефлектора радіотелескопа РТ-32.

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ МАТРИЦІ ПОХИБОК НАВЕДЕННЯ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ РЕЖИМІ

Для методики побудови матриці похибок наведення в автоматизованому режимі для С-діапазону радіохвиль введено такі припущення та обмеження:

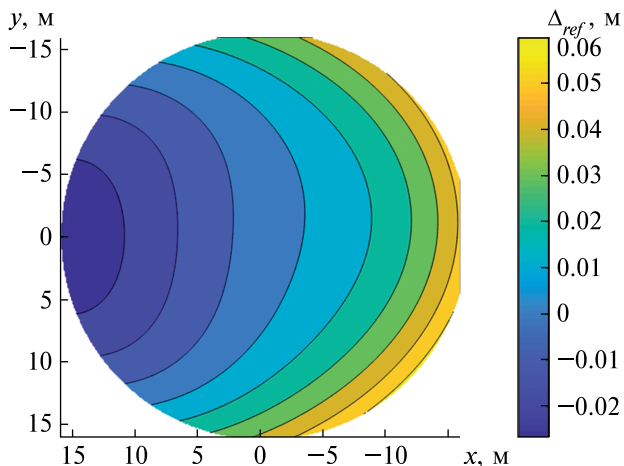


Рис. 4. Різниця деформацій рефлектора для двох його положень: $El = 5^\circ$ та $El = 45^\circ$

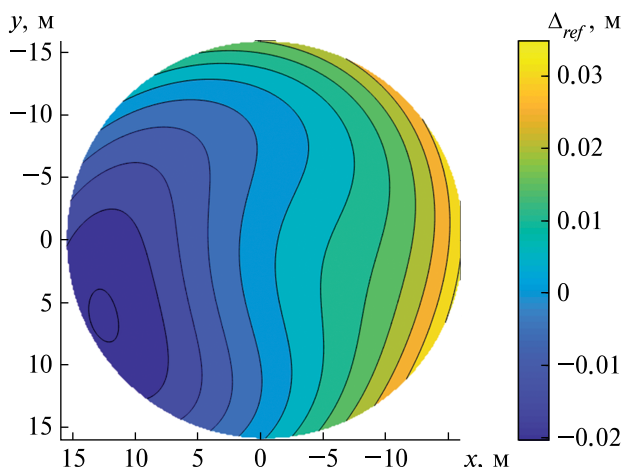


Рис. 5. Те ж для положень $El = 5^\circ$ та $El = 30^\circ$

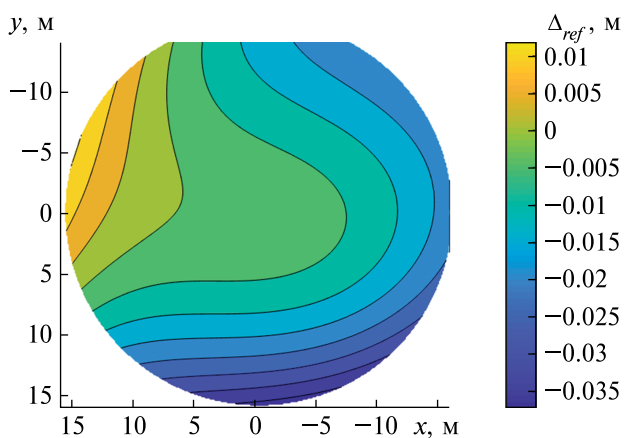


Рис. 6. Те ж для положень $El = 45^\circ$ та $El = 30^\circ$

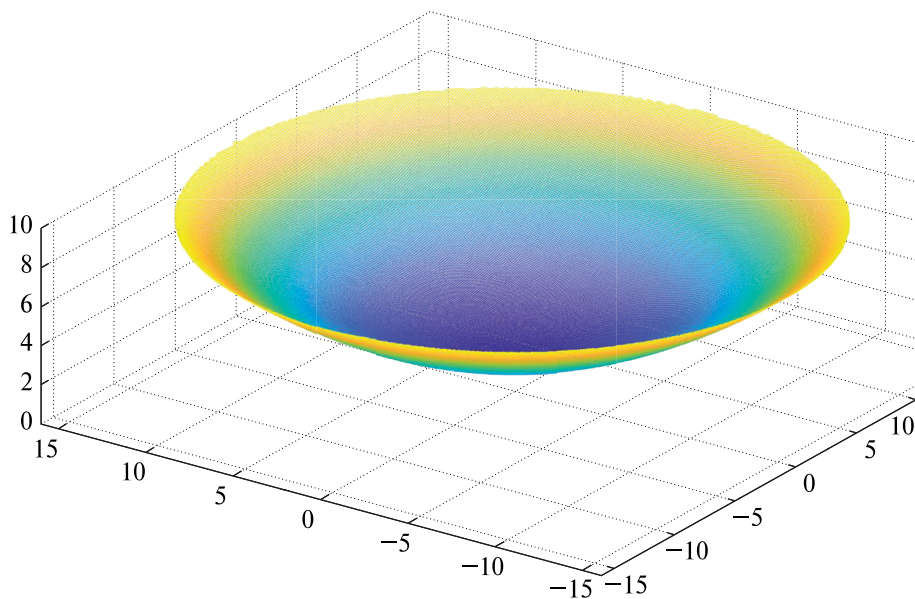


Рис. 7. 3D-модель рефлектора радіотелескопа РТ-32

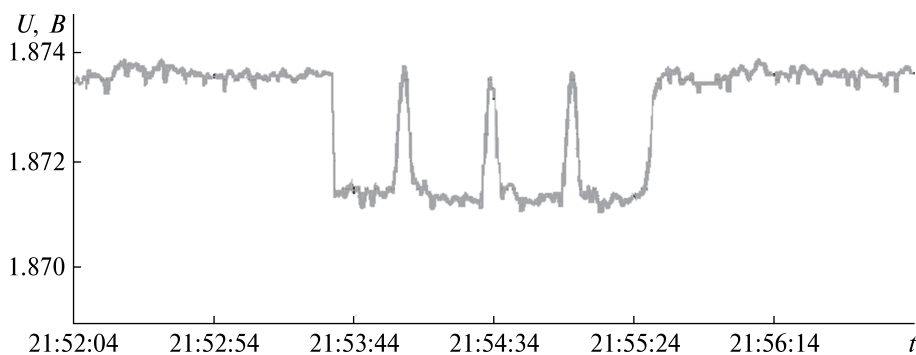


Рис. 8. Сканування радіоджерела 3C462 радіотелескопом РТ-32 за кутом місця

а) інструментальні вимірювання виконувались протягом шести місяців, в режимі 20 год на добу, під час виконання робіт відбувалися зміни метеоумов, які фіксувалися автоматичною метеостанцією для подальшого врахування в дослідженнях;

б) гістерезис антенних приводів не враховувався;

в) давач кута Kubler 8.F3663.4323.C722, з розрізняльною здатністю 17 біт ($\approx 9.89''$) встановлено через мультиплікатор із передаточним відношенням 900/19, тому кінцеве розрізнення дорівнює $0.208740234375''$ (що відповідає 22.6 біт на оберт), дані про положення осей передаються

кожних 10 мс, давач обчислює положення з періодом 10 мкс, невизначеність часової прив'язки отриманих даних становить ± 5 мкс.

Розроблена методика складається з чотирьох кроків.

На першому кроці задаються параметри сканування: лінійна розгортка по чергово за кутом місця та за азимутом; час проходу $T_{пр} = T_{ск}/2$ (де $T_{ск}$ — час сканування); амплітуди сканування за кутом місця ΔEl та азимутом ΔAz узгоджені з часом сканування. Формується первинна матриця похибок з нульовими значеннями.

На другому кроці виконується по чергове сканування кутом місця El та азимутом Az . Скану-

вання проводилося до отримання на радіометрі трьох перших контрастних максимумів сигналу від джерела (рис. 8) зі співвідношенням сигнал/шум >10 . Особливість процесу полягає в тому, що сканування за кожною з координат починається в напрямку зменшення кута.

На третьому кроці за результатами фіксації часу максимумів сигналу джерела для кожного екстремуму (t_1 , t_2 та t_3) розраховується різниця Δt_1 в секундах між першим та другим максимумами та різниця Δt_2 між другим та третім максимумами сигналів (рис. 9), їхнє середнє арифметичне Δt_Σ та відхилення в часі 2-го максимуму від середньої тривалості сканування:

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1,$$

$$\Delta t_2 = t_3 - t_2,$$

$$\Delta t_\Sigma = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2},$$

$$\Delta t_{err} = \Delta t_2 - \Delta t_\Sigma.$$

На четвертому, заключному, кроці виконується розрахунок абсолютного значення похибки наведення для обраної координати:

$$\Delta\theta_{Azerr} = \Delta t_{err} \frac{\Delta Az}{T_p}.$$

Визначена поправка $\Delta\theta$ для відповідної координати вводилася до матриці похибок, а кроки 2–4 повторюються для наступної координати.

Слід зазначити, що недоліком розробленої методики є нелінійність сканування при зміні напрямків руху, при цьому її перевагою є простота сприйняття та інтерпретації отриманих результатів людиною-оператором.

ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДИКИ ПОБУДОВИ МАТРИЦІ ПОХИБОК НАВЕДЕННЯ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ РЕЖИМІ

Для отримання первинних матриць похибок наведення в автоматизованому режимі протягом першого півріччя 2020 р. виконувались спостереження еталонних радіоджерел (таблиця) в режимі автосупроводу. При побудові матриць використано дані 1759 спостережень калібрувальних радіоджерел, які походились в різних точках їхніх ефемерид.

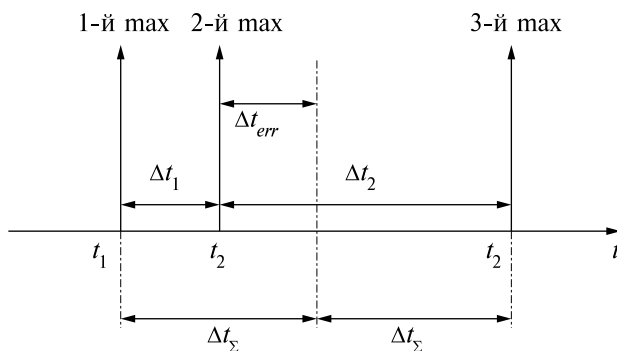


Рис. 9. Визначення похибки наведення $\forall \Delta t_2 > \Delta t_1$

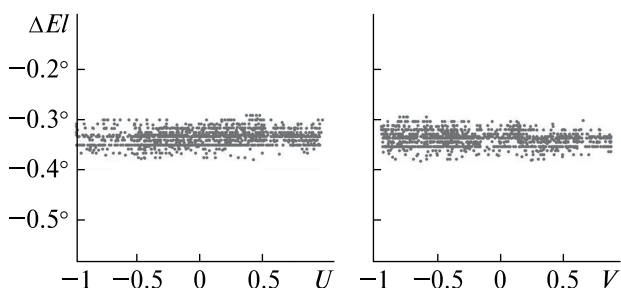


Рис. 10. Первинна матриця похибок наведення радіотелескопа РТ-32 за кутом місця в С-діпазоні радіохвиль

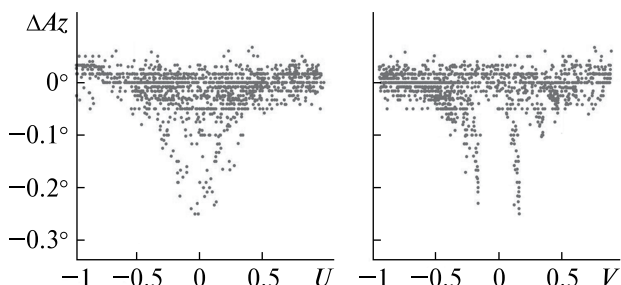


Рис. 11. Первинна матриця похибок наведення радіотелескопа РТ-32 за азимутом в С-діпазоні радіохвиль

Переважне використання активних ядер галактик як калібрувальні радіоджерела зумовлене тим, що саме ці об'єкти є точковими радіоджерелами, які доцільно використовувати, щоб уникнути ефекту сплутування при визначенні первинної матриці похибок та підвищити точність оцінок похибок.

За результатами зазначених спостережень побудовано першу матрицю похибок радіотелескопа РТ-32 за кутом місця та азимутом розмірності 81×81 відлік. На рис. 10 та 11 відображені візу-

Калібрувальні радіоджерела з ЗС-каталогу

Об'єкт, його розміри	Координати об'єкта		Щільність потоку, Ян				Примітки
	α_{2000}	δ_{2000}	150 МГц	1.4 ГГц	5 ГГц	22 ГГц	
3C 273 0.020"×0.016"	12 ^h 29 ^m 06.69 ^s	+02°03'08.6"	97.9	46±2.3	26.5...44.5 ±2.3	20...30 ±4.86	Flat spectrum
3C 353 ^c 30"×4"	17 20 28.15	−00 58 47.1	270±35	56.5±2.8	21.5±1.0	0.19±0.02	
3C 84 0.008"×0.015"	03 19 48.16	+41 30 42.1	57...74 ±1.5	13.1...22.8 ±0.5	16...23 ±1.25	3.9...6.0 ±1.0	Seyfert II Galaxy Perseus-A
3C 348* 20"×180"	16 51 11.1	+05 04 58	300.0	45.8±2.3	12.9 ±0.32	1.7±0.1	
3C 279 0.006"×0.007"	12 56 11.17	−05 47 21.5	22.1±3.1	7.6...11 ±0.5	11...13 ±0.4	14.3...20.6 ±2.0	Flat spectrum
3C 345 0.012"×0.007"	16 42 58.81	+39 48 37.0	13.2±0.1	8.0±0.4	5.5-8.5 ±0.3	6.9±0.4	
HB 89 0.005"×0.008"	21 48 05.46	+06 57 38.6	6.87	5.2...6.0 ±0.2	4.1...7.0	1.54	2145+067 (Cul 2145+067)
3C 66 0.5"×15"	02 23 11.41	+42 59 31.4	37.5±3.8	9.8±4.9	3.75±2.8		UGC 1841 — Seyfert I Galaxy
3C 98 4"×180"	03 58 54.44	+10 26 02.8	49.2±6.4	9.7...12.0 ±0.3	3.2...4.95 ±0.25	1.35±0.13	2C 349 — Seyfert 2 Galaxy
3C 430 8"×60"	21 18 13.3	+60 47 41	100.0	7.61±0.26	3.32±0.16	<1.7±0.9	
3C 327 7.5"×30"	16 02 27.4	+01 57 56	59±5.0	8.5...9.5 ±0.4	2.74...3.33 ±0.16		3C 327 — Seyfert 2 Galaxy
W3 10"×8"	02 27 04.10	+61 52 27.1		25.3±1.2			IC 1795
NGC 5128 ^c 7.5"×20"	13 25 27.62	−43 01 08.8	1104	4.5...5.2	53.8...62.8 ±10.	6.63±0.63	Centaurus A — Seyfert 2 Galaxy

алізації первинних матриць похибок наведення в С-діапазоні за кутом місця та азимутом. На рисунках осі абсцис (рис. 10, 11) наведено в напрямних косинусах (U , V), а осі ординат, які характеризують значення похибки за кутом місця, наведено в градусах. Результати приведено без первинної обробки, фільтрації, згладжування та з помилками людини-оператора першого та другого роду.

Аналіз матриць похибок наведення РТ-32 в С- та К-діапазонах показав, що в деяких точках небосхилу (найгірших за просторовою розрізненістю) кутові розміри ділянок, які не можуть бути точно відкореговані з використанням матриці такої розмірності, є доволі великими: $2.2^\circ \times 2.2^\circ$ (рис. 10, 11). Під час побудов первинних матриць похибок за кутом місця та за ази-

мутом виходили з цілком ймовірного припущення, що їхня поверхня буде гладкою у масштабах таких ділянок. Але останні пів року дослідної експлуатації виявили, що на поверхні матриці похибок за кутом місця є локальні екстремуми (мінімуми та максимуми), які лежать у межах одного відліку за просторовим розрізненням побудованої матриці. Крім того, підтвердилась наявність певних гістерезисів у наведенні за кутом місця, яка пов'язана із тим, з якого напрямку (від горизонту чи від zenіту) рухається джерело і, відповідно, йде наведення на об'єкт дослідження. Гістерезис коливався у межах $26''\dots43''$. Результати його досліджень будуть приведені в наступній статті.

Автоматична метеостанція та автоматичне врахування метеоумов програмою керування

дозволить впритул наблизитись до побудови та використання багатовимірних адаптивних матриць похибок в автоматичному режимі. Розробка методики побудови матриць похибок в автоматичному режимі є предметом подальшого дослідження.

Розробленою методикою вже більше року щодня користується чергова зміна Центру космічних досліджень та зв'язку в ході дослідної експлуатації радіотелескопа РТ-32, персонал Радіоастрономічного інституту НАН України та студенти й аспіранти Львівської політехніки під час навчання. Розроблено відповідні програмні модулі, які мають можливість простого інтегрування у будь-яке програмне забезпечення.

ВИСНОВКИ

Український радіотелескоп нового покоління РТ-32 є вагомим досягненням української науки та техніки.

В ході дослідної експлуатації були розроблені та втілені в програму керування РТ-32 методи та алгоритми підвищення точності його наведення в С-та К-діапазонах. Це дозволило досягти точності наведення порядку 36" в обох діапазонах, а також зареєструвати метанольні та гідроксильні мазери в С-діапазоні та водяні ма-

зери в К-діапазоні. У програму наведення РТ-32 було введено модифіковані первинні матриці похибок окремо в С-та К-діапазонах за кутом місця та додаткова опція спостереження швидких об'єктів типу комети. Тобто, радіотелескоп РТ-32 став більш гнучким та універсальним інструментом, який здатен вирішувати все складніші завдання.

Надалі планується розробити методики автоматичної побудови та алгоритми використання сімейства адаптивних матриць похибок наведення цього радіотелескопа, що має підвищити точність наведення РТ-32 до 10".

Робота РТ-32 в С- та К-діапазонах, розширення смуги його робочих частот в Х-діапазон, можливість одночасного спостереження однієї точки небесної сфери в трьох діапазонах вимагає розробки нових методів, способів та методик підвищення точності наведення, їхнього адекватного математичного опису та значного обсягу емпіричних досліджень.

*О. М. Ульянов та В. В. Захаренко дякують Вентспільському університету прикладних наук (Латвія) за підтримку цієї роботи коштами проекту «*Izp-2020/2-0121 Joint Latvian-Ukrainian study of peculiar radio galaxy "Perseus A*"».*

ЛІТЕРАТУРА

1. Антюфеев А. В., Королев А. М., Патока А. Н., Шульга В. М., Ульянов О. М., Резниченко А. М., Захаренко В. В., Присяжний В. И., Поихало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. Н., Ожинский В. В., Власенко В. П., Чміль В. М., Лебедь В. И., Паламар М. И., Чайковский А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицкий М. А., Натаров М. П., Стешенко С. А., Гламаздин В. В., Шубный А. И., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Пилипенко А. М. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 2. Оценка возможности проведения наблюдений спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. **24**, № 3. С. 163—183. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/> (дата звернення: 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>.
2. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Алексеев Є. А., Резніченко О. М., Кулагін І. О., Будніков В. В., Присяжний В. І., Поїхало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. М., Ожінський В. В., Власенко В. П., Чміль В. М., Сундучков І. К., Бердар М. М., Лебідь В. І., Паламар М. І., Чайковський А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицький М. А., Натаров М. П., Стешенко С. О., Гламаздин В. В., Шубний О. І., Кириленко А. О., Кулик Д. Ю. Створення радіотелескопа РТ-32 на базі антенної системи MARK-4В. 3. Гетеродини та власні шуми приймальної системи. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2020. **25**, № 3. С. 175—192. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1335> (дата звернення: 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.175>.
3. Ульянов О. М., Резніченко О. М., Захаренко В. В., Антюфеев О. В., Корольов О. М., Патока А. Н., Присяжний В. І., Поїхало А. В., Войтюк В. В., Мамарев В. М., Ожінський В. В., Власенко В. П., Чміль В. М., Лебідь В. І., Паламар М. І., Чайковський А. В., Пастернак Ю. В., Стрембицький М. А., Натаров М. П., Стешенко С. А., Гламаздин В. В., Шубний О. І., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Коноваленко О. О., Литвиненко Л. М., Яцків Я. С.

- Створення радіотелескопу RT-32 на основі антенної системи MARK-4B. 1. Проект модернізації та перші результати. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. **24**, № 2. С. 87—116. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1309/973> (дата звернення: 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.02.087>.
4. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Гіперболоїди. Вища математика в прикладах і задачах: 2-ге вид. К.: Центр учбової літери, 2009. 594 с.
 5. MARK-4B. Operation and maintenance handbook for antenna subsystem. Book 1. Part 1. Antenna structure. Tokyo. Japan, NEC Corporation, 1986.
 6. Ozhinskiy V. V., Vlasenko V. P., Poikhalo A. V. *Radio telescope RT-32 in space researches*. 20-th Gamow International Astronomical Conference–School “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology” (9–16 August, 2020, Odessa, Ukraine).
 7. Ulyanov O. *The New Ukrainian radiotelescope RT-32. First Results*. International Workshop “RT-32 Zolochiv: First results, EU collaboration, radio astronomy frontiers” (October 3–5, 2019, Zolochiv, Ukraine).

Стаття надійшла до редакції 19.03.2021

REFERENCES

1. Antyufeyev A. V., Korolev A. M., Patoka O. M., Shulga V. M., Ulyanov O. M., Reznichenko O. M., Zakharenko V. V., Prisiazhnii V. I., Poikhalo A. V., Voityuk V. V., Mamarev V. N., Ozhinskiy V. V., Vlasenko V. P., Chmil V. M., Lebed V. I., Palamar M. I., Chaikovskii A. V., Pasternak Yu. V., Strembitskii M. A., Natarov M. P., Steshenko S. O., Glamazdyn V. V., Shubny A. S., Kirilenko A. A., Kulik D. Y., Pylypenko A. M. (2019). Creating the RT-32 Radio Telescope on the Basic of MARK-4B Antenna System. 2. Estimation of the Possibility for Making Spectral Observations of Radio Astronomical Objects. *Radiofizyka i radioastronomiia*, **24**, № 3, 163—183. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/> (Last accessed 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>.
2. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Alekseev E. A., Reznichenko O. M., Kulahin I. O., Budnikov V. V., Prisiazhnii V. I., Poikhalo A. V., Voityuk V. V., Mamarev V. M., Ozhinskiy V. V., Vlasenko V. P., Chmil V. M., Sunduchkov I. K., Berdar M. M., Lebid V. I., Palamar M. I., Chaikovskii A. V., Pasternak Yu. V., Strembitskii, M. P. Natarov, S. O. Steshenko, V. V. Glamazdyn, O. I. Shubnyi, A. O. Kyrilenko M. A., Kulyk D. Yu. (2020). The RT-32 Radio Telescope Construction Based on the MARK-4B Antenna System. 3. Local Oscillators and Self-Noise of the Receiving System. *Radiofizyka i radioastronomiia*, **25**, № 3, 175—192. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1335> (Last accessed 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.175>.
3. Ulyanov O. M., Reznichenko O. M., Zakharenko V. V., Antyufeyev A. V., Korolev A. M., Patoka O. M., Prisiazhnii V. I., Poikhalo A. V., Voityuk V. V., Mamarev V. N., Ozhinskiy V. V., Vlasenko V. P., Chmil V. M., Lebed V. I., Palamar M. I., Chaikovskii A. V., Pasternak Yu. V., Strembitskii M. A., Natarov M. P., Steshenko S. O., Glamazdyn V. V., Shubny A. S., Kirilenko A. A., Kulik D. Y., Konovalenko A. A., Lytvynenko L. M., Yatskiv Ya. S. (2019). Creating the RT-32 Radio Telescope on the Basic of MARK-4B Antenna System. 1. Modernization Project and First Results. *Radiofizyka i radioastronomiia*, **24**, № 2, 87—116. URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1309/973> (Last accessed 19.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.02.087>.
4. Klepko V. Yu., Golets V. L. (2009). Hyperboloids. Higher Mathematics in Examples and Problems: 2nd edition. K.: The study literature center, 157.
5. MARK-4B. Operation and maintenance handbook for antenna subsystem. Book 1. Part 1. Antenna structure. Tokyo. Japan, NEC Corporation, 1986.
6. Ozhinskiy V. V., Vlasenko V. P., Poikhalo A. V. (2020). *Radio telescope RT-32 in space researches*. 20-th Gamow International Astronomical Conference–School “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology” (9–16 August, 2020, Odessa, Ukraine).
7. Ulyanov O. (2019). *The New Ukrainian Radiotelescope RT-32. First Results*. International Workshop “RT-32 Zolochiv: First results, eu collaboration, radio astronomy frontiers” (October 3–5, 2019, Zolochiv, Ukraine).

Received 19.03.2021

V. P. Vlasenko¹, Deputy Chief of the Center
Space Research and Communication Center of the National Space Facilities Control and Test Center, Zolochiv
ORCID ID: 0000-0001-8639-4415

E-mail: vlasenko.vp@gmail.com

V. M. Mamarev¹, Ph. D. in Engineering Sci.

Head of Research and Development Division

ORCID ID: 0000-0003-2233-7432

E-mail: mamarev@spacecenter.gov.ua

V. V. Ozhinsky¹, Ph. D. in Engineering Sci.

Chief of the Center

Space Research and Communication Center of the National Space Facilities Control and Test Center, Zolochiv

ORCID ID: 0000-0003-0830-2428

E-mail: ozvic@ukr.net

O. M. Ulyanov², Ph. D. in Phys.&Math., Senior Scientist Researcher

Head of Decameter Radio Astronomy Department

ORCID ID: 0000-0003-0934-0952

E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

V. V. Zakharenko², Dr. Sci. in Phys.&Math., Senior Scientist Researcher

Director of the Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-9977-824X

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

M. I. Palamar³, Dr. Sci. in Engineering, Professor

Head of the Instruments and Control-measurement Systems Department

ORCID ID: 0000-0002-8255-8491

E-mail: palamar.m.i@gmail.com

A. V. Chaikovskiy³, Ph. D. in Engineering Sci., Associate Professor

Associate Professor at the Instruments and Control-measurement Systems Department

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: chaikovskiy@gmail.com

¹ National Space Facilities Control and Test Center

8, Moscow Str., Kyiv, 01010, Ukraine

² The Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine

4, Mystetstv Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

³ Ternopil Ivan Pului National Technical University

56, Ruska Str., Ternopil, 46001, Ukraine

METHOD OF CONSTRUCTING THE PRIMARY ERROR MATRIX OF THE RT-32 RADIO TELESCOPE IN AN AUTOMATED MODE

2020 was the year of the introduction of the Ukrainian new generation radio telescope RT-32 into the experimental operation. The test results of maser hydrogen and hydroxyl lines obtained during the experimental operation confirmed the correctness of the calculations and technological solutions of Ukrainian scientists and manufacturers Consortium. One of the further development directions of RT-32 as a radio astronomical research tool is to increase the accuracy of pointing the radio telescope to radio astronomical sources. The latter is to be achieved by automating the processes of guidance error matrices formation and their integration during the observations. The formation of such a matrix presupposes taking into account the structural features of the antenna system and weather conditions. The paper presents the results of geodetic measurements of the antenna system surface on different elevation angles, construction of the 3D model of the reflector. The method of constructing the error matrix, which at this stage of research provides the necessary simplicity of perception and interpretation of the obtained results by the human operator, is proposed. The results of the developed method verification using reference radio sources are given and the error matrices of elevation and azimuth pointing (dimension 81×81 elements) obtained with the use of the said method are presented. The introduction of the results presented in the article into the radio telescope control system allowed increasing the accuracy of RT-32 radio telescope pointing in the C- and K- bands to the value of $\sim 36''$. This work partially was supported by the Latvian Council of Science project "Joint Latvian-Ukrainian study of peculiar radio galaxy "Perseus A" in radio and optical bands. Nr: lzp-2020/2-0121".

Keywords: radio telescope, error matrix, antenna system, radio sources.