

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.053>

УДК 520.272.2: 621.396.677.494

**В. П. ВЛАСЕНКО**<sup>1</sup>, заст. нач. центру космічних досліджень і зв'язку

ORCID ID: 0000-0001-8639-4415

E-mail: vlasenko.vp@gmail.com

**В. М. МАМАРЄВ**<sup>1</sup>, нач. відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0003-2233-7432

E-mail: mamarev@spacecenter.gov.ua

**В. В. ОЖІНСЬКИЙ**<sup>1</sup>, нач. центру космічних досліджень і зв'язку, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0003-0830-2428

E-mail: ozvic@ukr.net

**О. М. УЛЬЯНОВ**<sup>2</sup>, 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. ЗАХАРЕНКО**<sup>2</sup>, директор, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-9977-824X

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

**М. І. ПАЛАМАР**<sup>3</sup>, 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. ЧАЙКОВСЬКИЙ**<sup>3</sup>, доцент кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем, канд. техн. наук, доцент

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: chaikovskiy@gmail.com

**С. П. ФРИЗ**<sup>4</sup>, нач. кафедри телекомунікацій та радіотехніки, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: antares69@ukr.net

<sup>1</sup> Національний центр управління та випробувань космічних засобів

вул. Московська 8, Київ, Україна, 01010

<sup>2</sup> Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України

вул. Мистецтв 4, Харків, Україна, 61002

<sup>3</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

вул. Руська 56, Тернопіль, Україна, 46001

<sup>4</sup> Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

Проспект Миру 22, Житомир, Україна, 10004

## МЕТОД АВТОМАТИЧНОЇ ПОБУДОВИ МАТРИЦІ ПОХИБОК РАДІОТЕЛЕСКОПА РТ-32. МЕТОДИКА АВТОМАТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК НАВЕДЕННЯ

*15 березня 2021 року фахівцями Національного центру управління випробувань космічних засобів та Радіоастрономічного інституту НАН України за допомогою вітчизняного радіотелескопа нового покоління РТ-32 (м. Золочів Львівської області)*

Цитування: Власенко В. П., Мамарєв В. М., Ожінський В. В., Ульянов О. М., Захаренко В. В., Паламар М. І., Чайковський А. В., Фриз С. П. Метод автоматичної побудови матриці похибок радіотелескопа РТ-32. Методика автоматичного оцінювання похибок наведення. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 6 (133). С. 53–64. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.053>

проведено спостереження та успішне реєстрування позагалактичного випромінювання радіогалактики 3С84 (Персей-А), мазерів з галактичної молекулярної хмари W3, радіовипромінювання метанольного мазера з галактичного радіоджерела G188.946+0.886. Ці дослідження виконано з метою підготовки до виконання спільного українсько-латвійського радіоастрономічного проєкту.

Результати проведених спостережень підтвердили світовий рівень характеристик радіотелескопа РТ-32, ефективність первинної матриці похибок та виявили ряд недоліків у функціонуванні системи наведення. Зокрема, первинна матриця наведення має недостатню дискретність, містила помилки першого та другого роду.

Описується метод автоматичної побудови матриці похибок радіотелескопа за даними радіометричного приймача та приймачів-реєстраторів. Метод побудови матриці похибок забезпечує автоматичну обробку отриманих радіометричних даних. Наведено результати верифікації розробленого методу з використанням еталонних радіоджерел різного типу та отримані з її використанням елементи матриці похибок наведення за кутом місця та азимутом. Впровадження в систему керування радіотелескопом отриманих результатів дозволило підвищити точність наведення радіотелескопа РТ-32.

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

В ході побудови 3D-моделі радіотелескопа РТ-32 [2] за вихідні дані та обмеження взято припущення розробника антенної системи MARK-4В про поступальний рух осей симетрії антенної системи [11], близькості конструкції її рефлектора до ідеалізованої. В роботі [11] обґрунтовано, що основні навантаження на поверхню рефлектора складаються з вагових, вітрових та теплових, а також навантажень, що виникають під час прискореного руху дзеркала. Сумарне навантаження отримувалися лінійною комбінацією кількох складових, наприклад вагові навантаження при будь-якому куті місця є лінійною комбінацією бічного й верхнього вагових навантажень параболічної антени. Побудована первинна матриця похибок [2] виявила невідповідність припущень щодо параболічності головного рефлектора та поступальності руху антенної системи. Це призвело до необхідності коригування моделі оцінювання якості конструкції головного рефлектора та його навантажень з метою покращення її адекватності. Розвиток цієї моделі є одним з напрямків подальших досліджень.

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 відкоректовані з використанням матриці такої розмірності, є доволі великими ( $\sim 2.2^\circ \times 2.2^\circ$ ) [2]. Під час побудови первинних матриць похибок за кутом місця та за азимутом виходили з цілком ймовірного припущення, що їхня поверхня буде гладкою у масштабах таких ділянок. Але останні півроку дослідної експлу-

тації показали, що на поверхні матриці похибок за кутом місця наявні локальні екстремуми (мінімуми та максимуми), які лежать у межах одного відліку побудованої матриці [2].

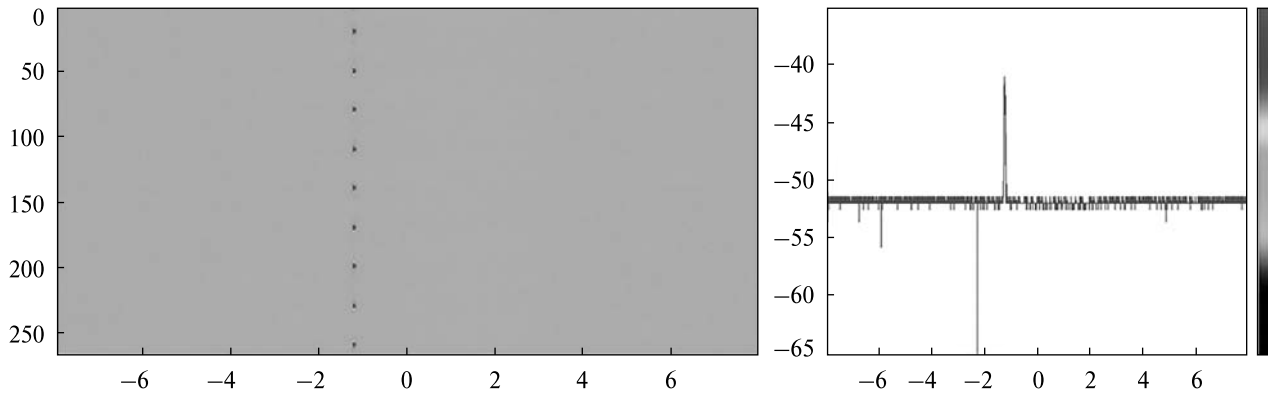
Тому наступним кроком у покращенні унікальних характеристик радіотелескопа РТ-32 стало розроблення методу автоматичної побудови матриці похибок на основі сканування за функцією синус, що є логічним продовженням та доповненням розробленої в роботі [2] методики та дозволяє усунути помилки першого та другого роду людини-оператора.

Метою роботи є висвітлення наукових та практичних результатів першого етапу розробки методу автоматичної побудови матриці похибок радіотелескопа РТ-32, зокрема автоматичного оцінювання похибок наведення за результатами спостережень радіоджерел.

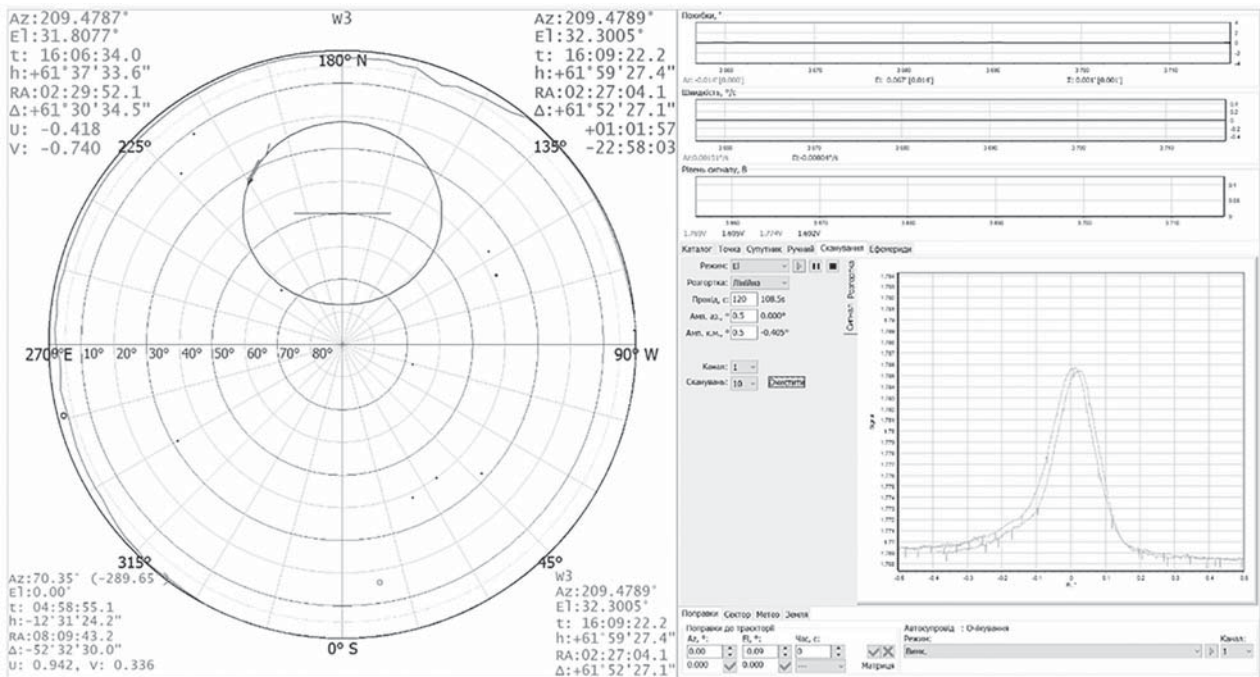
#### ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС ДОСЛІДЖЕННЯ

Емпіричний аналіз точності головного рефлектора РТ-32 [2], попереднє оцінювання смуг частот [5], результати спостережень і реєстрування випромінювання сейфертівської радіогалактики 3С84, мазерів з галактичної молекулярної хмари W3 (рис. 1), радіовипромінювання метанольного мазера з галактичного радіоджерела G188.946+0.886 підтвердили ефективність закладених конструкторських рішень [11] щодо ідеалізованої моделі конструкції, потенційних деформацій зовнішньої обшивки, балочних елементів та регулювальних болтів.

Побудовані з використанням [2] первинні матриці похибок забезпечили істотне зменшення



**Рис. 1.** Сканування метанольного мазера на частоті 6668.5 МГц. Частотна роздільна здатність (горизонтальна вісь)  $\Delta f = 976.5625$  Гц. Часова роздільна здатність (вертикальна вісь)  $\Delta t = 1.047552$  с. Спектральна лінія мазера на молекулі метанолу  $\text{CH}_3\text{OH}$  спостерігається поблизу нульового звуку, який відповідає частоті 6.6685 ГГц



**Рис. 2.** Сканування молекулярної хмари W3 по куту місяця

сумарної похибки наведення антенної системи  $\Delta_{\Sigma}$ , проте ґрунтовний аналіз отриманих результатів свідчить про їхню недостатню дискретність та дозволяє стверджувати про наявність нелінійної залежності складових похибки.

Об'єктивні недоліки лінійної моделі сканування та помилки особи, яка приймає рішення,

цілком можливо усунути на наступному етапі дослідження, використовуючи синусоїдальний закон сканування радіоджерел та метод автоматичної побудови матриці похибок радіотелескопа РТ-32.

Варто зазначити, що цей метод є універсальним, може застосовуватись для різних радіоте-

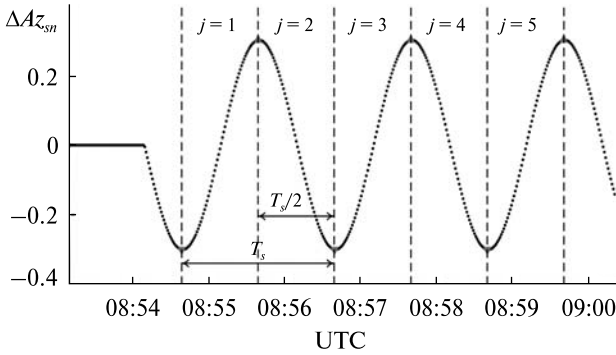


Рис. 3. Фрагмент запису відхилення антенної системи з п'ятьма одиночними скануваннями при скануванні по азимуту (5 травня 2021 р.)

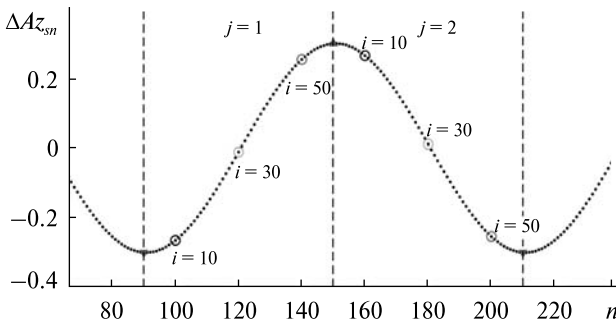


Рис. 4. Залежність номерів трьох вимірювань з номерами  $i = 10, 30$  та  $50$  двох одиночних сканувань ( $j = 1, 2$ ) від номера вимірювання  $n$  матриці  $M_{mes_m}$

лескопів та різних алгоритмів наведення. Він є однією із унікальних складових радіотелескопа РТ-32, який може одночасно спостерігати одну область простору в декількох діапазонах.

З метою отримання вихідних даних для аналізу за один сеанс зв'язку під час програмного супроводу радіотелескопом джерела радіовипромінювання проводиться сканування джерела за синусоїдальним законом (рис. 2).

За одним і тим самим джерелом проводяться два умовних послідовних цикли: перший цикл сканування проводиться за кутом місця  $El$ , другий — за азимуту  $Az$ . Поточна похибка наведення за однією координатою ( $El$  чи  $Az$ ) оцінюється для кожного синусоїдального сканування за показником відхилення максимуму діаграми спрямованості (максимуму радіометричного сигналу) від розрахункових координат радіоджерела.

### МЕТОДИКА АВТОМАТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК НАВЕДЕННЯ

Вихідними даними та обмеженнями для отримання оцінок похибок є:

- побудована відповідно до [2] первинна матриця похибок та результати сканування точкових радіоджерел, аналіз яких дає змогу оцінити похибки наведення та якість головного рефлектора радіотелескопа і попередньо оцінити необхідні діапазони сканування;
- інтервал дискретизації вимірів  $\Delta\tau_{mes}$  (для радіотелескопа РТ-32 в ході досліджень становив 10 мс);
- амплітуда сканування за кутом місця  $\Delta El_{smax}$ ;
- амплітуда сканування за азимуту  $\Delta Az_{smax}$ ;
- період сканування  $T_s$ .

За один  $m$ -й цикл спостереження  $T_{sur}$  одного джерела формується матриця вимірювань  $M_{mes_m}$ :

$$M_{mes_m} = \begin{bmatrix} \tau_1 & EL_1 & Az_1 & U_1 & \Delta El_{s1} & \Delta Az_{s1} & P_{atm1} & T_{air1} & h_{air1} & \mathbf{V}_{wind1} & w_{mm1} \\ \tau_2 & EL_2 & Az_2 & U_2 & \Delta El_{s2} & \Delta Az_{s2} & P_{atm2} & T_{air2} & h_{air2} & \mathbf{V}_{wind2} & w_{mm2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_n & EL_n & Az_n & U_n & \Delta El_{sn} & \Delta Az_{sn} & P_{atmn} & T_{airn} & h_{airn} & \mathbf{V}_{windn} & w_{mmn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_N & EL_N & Az_N & U_N & \Delta El_{sN} & \Delta Az_{sN} & P_{atmN} & T_{airN} & h_{airN} & \mathbf{V}_{windN} & w_{mmN} \end{bmatrix},$$

де  $N$  — кількість вимірювань у поточному циклі спостереження,  $\tau_n$  — час прив'язки  $n$ -го виміру,  $EL_n$  — поточний кут місця,  $Az_n$  — поточний азимут,  $U_n \in \{U_1, \dots, U_k, \dots, U_K\}$  — напруга на виході радіометричних приймачів для загального випадку,  $k = 1, \dots, K$  — номер радіометричного каналу,  $K = 2 \vee 4$  — кількість каналів реєстрації, залежить від налаштувань та джерел спостережень,  $\Delta El_{sn}$  — різниця між поточним і розрахунковим кутами місця в режимі сканування,  $\Delta Az_{sn}$  — різниця між поточним і розрахунковим азимутами в режимі сканування,  $P_{atmn}$  — поточний атмосферний тиск,  $T_{airn}$  — поточна температура навколишнього середовища,  $h_{airn}$  — поточна відносна вологість повітря,  $\mathbf{V}_{windn}$  — вектор швидкості вітру,  $w_{mmn} \in \{q, v\}$  — опади,  $q$  — кількість опадів у мм води за годину,  $v$  — тип опадів.

Кожен рядок отриманої за сеанс (цикл) спостережень матриці  $M_{mes_m}$  є серією прив'язаних за часом вимірювань. Серія вимірювань матриці  $M_{mes_m}$  складається з  $N_s$  одиночних скану-

вань. Під одиночним скануванням розуміємо сукупність всіх вимірів, отриманих між двома послідовними екстремальними положеннями антенної системи під час сканування. На рис. 3 зображено відхилення антенної системи при скануванні джерела за азимутом. Екстремальні положення антенної системи позначено червоними трикутниками. Кількість одиночних сканувань  $N_s$  на представленому графіку дорівнює п'яти. Інтервал часу одиночного сканування відповідає одному півперіоду сканування  $T_s/2$ . Кожне  $j$ -те одиночне сканування складається з  $N_j$  вимірів з  $M_{mes_m}$ . Кожному  $i$ -му вимірюванню  $j$ -го одиночного сканування відповідає відповідний  $n$ -й рядок  $M_{mes_m}$  (рис. 4).

Необхідно за отриманою  $M_{mes_m}$  визначити відповідні похибки наведення антени  $\Delta\theta_{trj} \in \{\Delta El_{trj}, \Delta Az_{trj}\}$  у відповідному каналі  $j$ -го одиночного сканування. Це в загальному підсумку зводиться до пошуку максимуму радіометричного сигналу на половині інтервалу сканування та визначення його моменту часу  $\tau_j$ .

Фактично під час початку циклу сканування оператору чи планувальнику відомо, за яким з кутів здійснювалося сканування, але в умовах, наприклад, дистанційного керування, потрібно спочатку визначити з  $M_{mes_m}$ , за якою саме координатою провадилося сканування. Для цього за спрощеними формулами необхідно оцінити, для якого з кутів дисперсія різниць між поточним в режимі сканування і розрахунковим кутами більша [6]:

$$D_{\Delta El_s} = \left( \sum_{n=1}^N \frac{\Delta El_{sn}^2}{N} - \left( \sum_{n=1}^N \frac{\Delta El_{sn}}{N} \right)^2 \right) / N,$$

$$D_{\Delta Az_s} = \left( \sum_{n=1}^N \frac{\Delta Az_{sn}^2}{N} - \left( \sum_{n=1}^N \frac{\Delta Az_{sn}}{N} \right)^2 \right) / N,$$

де при  $D_{\Delta El_s} > D_{\Delta Az_s}$  сканування здійснюється за кутом місця, а при  $D_{\Delta El_s} < D_{\Delta Az_s}$  — за азимутом.

Сигнал  $j$ -го сканування радіометра є сумою двох складових: корисного сигналу, який згортається з діаграмою спрямованості радіотелескопа та шумового фону. Результати досліджень [1, 2, 4, 5, 10] в ході розроблення методу свідчать про

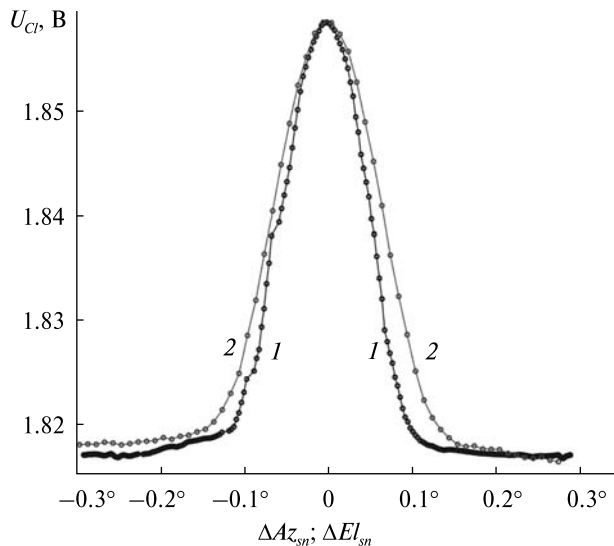


Рис. 5. Діаграма спрямованості РТ-32 у площині кута місця (1) та азимута (2)

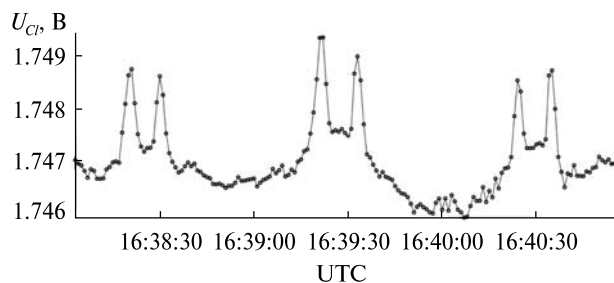


Рис. 6. Зміна рівня фонового сигналу на низьких кутах місця ( $El = 15^\circ$ ) за шість сканувань по куту місця (7 жовтня 2020 р.)

те, що діаграма спрямованості РТ-32 має вигляд, зображений на рис. 5, а фонові складові при невеликих відхиленнях змінюються незначно, найбільший рівень цієї складової спостерігається на низьких кутах місця (рис. 6). На радіотелескопі РТ-32 низькі кути місця — це кути, менші за  $30^\circ$ .

Для роботи алгоритмів автоматичної обробки  $M_{mes_m}$  найбільш доцільним виявилось відображення радіометричного сигналу функцією Гаусса (рис. 7). Фонова складова на інтервалі сканування досить точно моделюється лінійним законом. Функція Гаусса дозволяє ефективно визначити положення максимуму головної пелюстки, яка пов'язана з похибками наведення, та відкидати внесок бічних пелюсток.



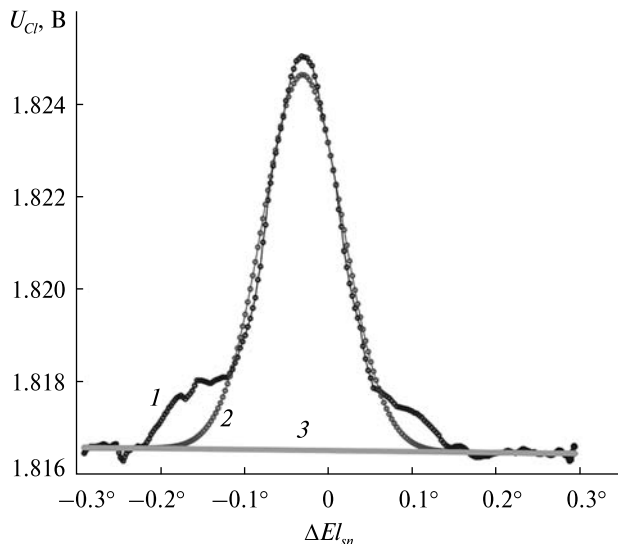


Рис. 7. Виміряні та модельні значення радіометричного сигналу: 1 — вимірний сигнал радіометра, 2 — модельний, 3 — фоновий шум

Зображена на рис. 7 модель радіометричного сигналу описується виразом

$$\hat{U}_{ijk}(\theta_{jk}) = \hat{U}_{Gijk}(\theta_{jk}) + \hat{U}_{Lijk}(a_{Ljk}, b_{Ljk}) = a_{Gjk} \exp\left(-\frac{(x_{Sij} - \Delta\theta_{jk})^2}{2\sigma_{Gjk}^2}\right) + a_{Ljk}x_{Sij} + b_{Ljk}, \quad (1)$$

де  $\hat{U}_{ijk}(\theta_{jk})$  — модельне  $i$ -те значення радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $\hat{U}_{Gijk}(\theta_{jk})$  — модельне  $i$ -те значення сигнальної складової радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $\hat{U}_{Lijk}(a_{Ljk}, b_{Ljk})$  — модельне  $i$ -те значення фонової складової радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $x_{Sij} = \Delta Az_{sij} \vee \Delta EL_{sij}$  — значення  $i$ -го відхилення антени від розрахункових координат радіоджерела під час сканування за азимутом чи кутом місця  $j$ -го сканування,  $\theta_{jk} \in \{a_{Gjk}, \sigma_{Gjk}, \theta_{jk}\}$  — масив параметрів сигнальної складової радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $a_{Gjk}$  — модельна амплітуда сигнальної складової радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $\sigma_{Gjk}$  — параметр форми сигнальної складової радіометричного сигналу  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $\theta_{jk}$  — похибка наведення антени під час  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі,  $a_{Ljk}, b_{Ljk}$  — ліній-

ні коефіцієнти фонової складової  $j$ -го сканування в  $k$ -му каналі.

Якщо сканування здійснювалося з урахуванням первинної матриці похибок [2], вираз (1) матиме вигляд

$$\hat{U}_{ijk}(\theta_{jk}) = a_{Gjk} \exp\left(-\frac{(x_{Sij} + x_{Mij} - \Delta\theta_{jk})^2}{2\sigma_{Gjk}^2}\right) + a_{Ljk}x_{Sij} + b_{Ljk}, \quad (2)$$

де  $x_{Mij}$  — відповідне до інтервалу сканування значення елемента первинної матриці похибок.

Лінійні коефіцієнти фонової складової  $a_{Ljk}$  та  $b_{Ljk}$  оцінюються за вимірами, які належать тільки фоновій складовій та лежать на границях кутів сканування (рис. 7). Для їхнього розрахунку використаємо рівняння прямої, яка проходить через дві точки [6]:

$$\frac{x_{2jk} - x_{1jk}}{x_{2jk} - x_{1jk}} = \frac{\hat{U}_{Lijk}(a_{Ljk}, b_{Ljk}) - U_{1jk}}{U_{2jk} - U_{1jk}}, \quad (3)$$

де

$$x_{1jk} = \frac{1}{N_{edgejk}} \sum_{i=1}^{N_{edgejk}} x_{Sij},$$

$$x_{2jk} = \frac{1}{N_{edgejk}} \cdot \sum_{i=N_j - N_{edgejk} + 1}^{N_j} x_{Sij}$$

— середні значення відхилення антени радіотелескопа на границях  $j$ -го сканування, які розраховано за  $N_{edgejk}$  першими та  $N_{edgejk}$  останніми вимірюваннями відхилення антени відповідно,

$$U_{1jk} = \frac{1}{N_{edgejk}} \sum_{i=1}^{N_{edgejk}} U_{ijk},$$

$$U_{2jk} = \frac{1}{N_{edgejk}} \cdot \sum_{i=N_j - N_{edgejk} + 1}^{N_j} U_{ijk}$$

— середні значення фонової складової на границях  $j$ -го сканування,  $N_{edgejk} = (0.1 \dots 0.15) N_{jk}$  — кількість вимірювань сканування, за якими обчислюються складові рівняння прямої.

Після перетворення виразу (3) отримуємо залежність значення фонової складової  $U_{Ljk}$  радіометричного сигналу від відхилення  $x_{Sij}$  антени на  $j$ -му скануванні як рівняння прямої:

$$\hat{U}_{Lijk}(a_{Ljk}, b_{Ljk}) = a_{Ljk}x_{Sij} + b_{Ljk}, \quad (4)$$

при

$$a_{Ljk} = \frac{U_{2jk} - U_{1jk}}{x_{2jk} - x_{1jk}}, \quad b_{Ljk} = \frac{U_{2jk} - U_{1jk}}{x_{2jk} - x_{1jk}} x_{1jk} + U_{1jk}. \quad (5)$$

Оптимізаційним критерієм для визначення відхилення (похибки)  $j$ -го сканування є мінімум суми квадратів між вимірними  $U_{ijk}$  та модельними  $\hat{U}_{ijk}(\theta_{jk})$  значеннями:

$$F(\theta_{jk}) = \sum_{i=1}^{N_j} (U_{ijk} - \hat{U}_{ijk}(\theta_{jk}))^2 \xrightarrow{\theta_{jk}} \min. \quad (6)$$

За результатами розв'язання оптимізаційної задачі отримуємо оцінки  $\Delta\hat{\theta}_{jk}$ , амплітуди  $\hat{a}_{Gjk}$  та  $\hat{\sigma}_{Gjk}$ . Розв'язання (6) виконується за алгоритмом Левенберга — Марквардта [7, 9].

З метою якісного формування матриці вимірювань  $M_{mes}$  поточного сканування попередньо необхідно розбити масив вимірювань на одиночні (елементарні) сканування. У випадку РТ-32 в ході емпіричних досліджень відхилення антени від розрахункових координат змінюється періодично за синусоїдальним законом. Програмно реалізовано, що на початку сканування антена відхиляється у від'ємний бік за визначеним кутом. Номер елементарного сканування  $j_{\tau_n}$  визначається як номер півперіоду, якому відповідають ряди матриці  $M_{mes_m}$  з часовою прив'язкою  $\tau_n$  (перший стовпець цієї ж матриці). Номер  $j_{\tau_n}$  визначається як ціла кількість півперіодів, які містяться між моментами прив'язки  $\tau_{smax0}$  (що відповідає першому  $\Delta El_{smax}$  чи  $\Delta Az_{smax}$ ) та  $\tau_N$ :

$$j_{\tau_n} = \begin{cases} \text{floor} \left[ 2 \frac{\tau_n - \tau_{smax0}}{T_s} \right] + 1 & \text{при } \tau_n - \tau_{smax0} \geq 0, \\ 0 & \text{при } \tau_n - \tau_{smax0} < 0, \end{cases} \quad (7)$$

де floor — операція відкидання дробової частини числа,  $\tau_{smax0}$  — час прив'язки першого відхилення антени на максимальне значення кута, по якому відбувається сканування.

Множина номерів  $I_j$  вимірювань (рядків матриці  $M_{mes_m}$ ), які належать до  $j$ -го елементарного сканування, знаходиться як

$$I_j = \{n \mid j = j_{\tau_n}\}. \quad (8)$$

Рис. 8 ілюструє визначення  $j_{\tau_n}$  (ступінчаста функція) в ході нормального, без завад, збоїв та

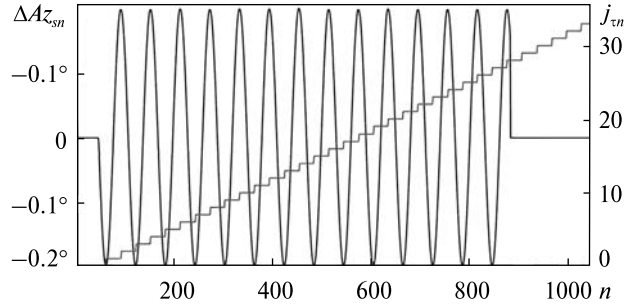


Рис. 8. Визначення  $j_{\tau_n}$  (ступінчаста функція) в ході нормального сканування по азимуту (синусоїда)

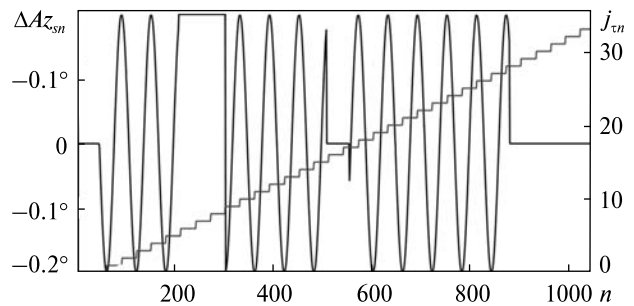


Рис. 9. Визначення  $j_{\tau_n}$  (ступінчаста функція) в умовах технологічних розривів

технологічних розривів, сканування по азимуту з  $\Delta Az_{smax} = 0.2^\circ$ , та 1000 рядків  $M_{mes}$ .

Рис. 9 ілюструє визначення  $j_{\tau_n}$  (ступінчаста функція) в умовах технологічних розривів, аналогічного сканування по азимуту (синусоїда).

Під час сканування в різних напрямках є ймовірність гістерезису, що було підтверджено емпіричними дослідженнями РТ-32 [2]. Тому для кожного елементарного сканування  $j_{\tau_n}$  необхідно визначити напрямок руху антени. Для цього на ньому визначаються різниці відхилення антени

$$\Delta_{sijn} = x_{Sij(n+1)} - x_{Sijn}. \quad (9)$$

Кожен рядок матриці  $M_{mes_m}$  відповідно до знаку  $\Delta_{sijn}$  доповнюється елементом  $Dir_{ijn}$  (12-й стовпець матриці), який характеризує напрямок руху антени в ході сканування. Якщо під час сканування антена рухається в напрямку до зеніту та ліворуч — азимутом  $Dir_{ijn} = 1$ , а якщо в напрямку до горизонту та праворуч — азимутом

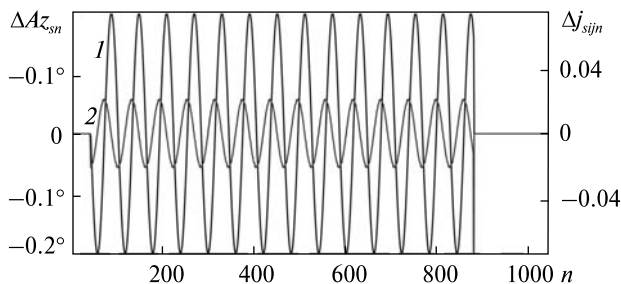


Рис. 10. Ознака напрямку руху в ході нормального сканування (1 –  $\Delta Az_{sn}$ , 2 –  $\Delta j_{sijn}$ )

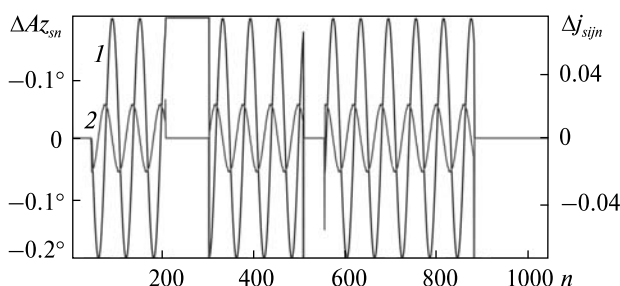


Рис. 11. Ознака напрямку руху в умовах технологічних розривів (1 –  $\Delta Az_{sn}$ , 2 –  $\Delta j_{sijn}$ )

$Dir_{ijn} = -1$  (рис. 10...13), на шкалі зліва приведено координату, по якій здійснюється сканування, на шкалі справа — різницю між двома вимірами.

$$Dir_{ijn} = \begin{cases} 1 & \forall \Delta_{sijn} > 0, \\ -1 & \forall \Delta_{sijn} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

У випадку збоїв, завод чи частих технологічних розривів деякі елементарні сканування  $j_{\tau_n}$  будуть неповними чи міститимуть інформацію, якої недостатньо для достовірного оцінювання похибки наведення. Такі дані необхідно виключити з подальшого аналізу. Введемо поняття показника повноти елементарного сканування  $\xi_j \in [0, 1]$ . Кожне повне елементарне сканування має містити кількість  $N_j$  рядків вимірювань у :

$$N_j = \frac{T_s}{2\Delta\tau_{mes}}. \quad (11)$$

Фактична кількість рядків вимірів, які містять інформацію, придатну для оцінювання, буде до-

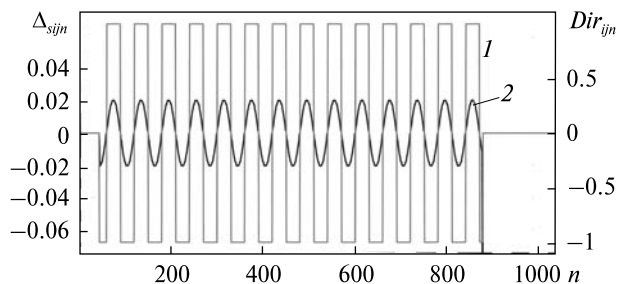


Рис. 12. Ознака напрямку руху в ході нормального сканування (1 –  $Dir_{ijn}$ , 2 –  $\Delta_{sijn}$ )

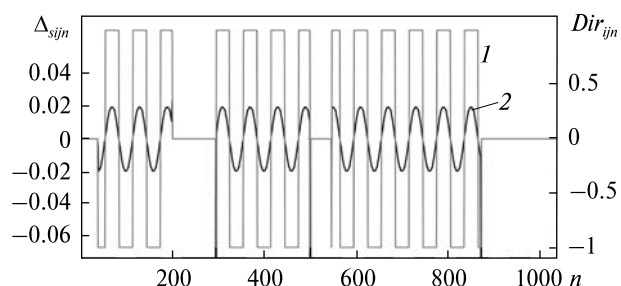


Рис. 13. Ознака напрямку руху в умовах технологічних розривів (1 –  $Dir_{ijn}$ , 2 –  $\Delta_{sijn}$ )

рівнювати

$$N_{factj} = \sum_{i \in I_j} |Dir_{ijn}|. \quad (12)$$

Тоді показник повноти елементарного сканування  $j_{\tau_n}$  обчислюється з виразу

$$\xi_j = \frac{N_{factj}}{N_j}. \quad (13)$$

Інформація елементарного сканування  $j_{\tau_n}$  буде придатною для оцінювання за умови

$$\xi_j \geq 0.85. \quad (14)$$

Вибір значення нижньої границі  $\xi_j$  зумовлений емпіричним оцінюванням в ході досліджень РТ-32, для радіотелескопів з іншими системами керування воно може змінюватися. Якщо умова (14) не виконується, інформація елементарного сканування  $j_{\tau_n}$  є непридатною та виключається з подальшої обробки.

Похибка наведення антени (оцінка похибки наведення), яка закладається до матриці похи-



бок, має бути точно прив'язана до часу та координат наведення антенної системи і відповідати певним метеоумовам [2]. Оцінка похибки наведення лежить між двома послідовними відхиленнями антени від розрахункових координат радіоджерела під час сканування по азимуту чи куту місця:

$$Az_{ijl} [x_{Sijl}, x_{Sijr}], \quad (15)$$

де  $x_{Sijl}$  — ліве значення відхилення з часовою прив'язкою  $\tau_l$ ,  $x_{Sijr}$  — праве значення відхилення з часовою прив'язкою  $\tau_r$ .

Точний час прив'язки оцінки помилки  $j$ -го сканування у  $k$ -му каналі визначається з рівняння прямої

$$\frac{\Delta\hat{\theta}_{jk} - x_{Sijl}}{x_{Sijr} - x_{Sijl}} = \frac{\tau_{\Delta\hat{\theta}_{jk}} - \tau_l}{\tau_r - \tau_l}. \quad (16)$$

Розрахункові координати азимута  $Az_{\Delta\hat{\theta}_{jk}}$  та кута місця  $El_{\Delta\hat{\theta}_{jk}}$ , яким відповідає оцінка, визначаються аналогічно:

$$\frac{Az_{\Delta\hat{\theta}_{jk}} - Az_{ijl}}{Az_{ijr} - Az_{ijl}} = \frac{\tau_{\Delta\hat{\theta}_{jk}} - \tau_l}{\tau_r - \tau_l}, \quad (18)$$

$$\frac{El_{\Delta\hat{\theta}_{jk}} - El_{ijl}}{El_{ijr} - El_{ijl}} = \frac{\tau_{\Delta\hat{\theta}_{jk}} - \tau_l}{\tau_r - \tau_l}, \quad (19)$$

де  $Az_{ijl}$  — ліве значення азимута з часовою прив'язкою  $\tau_l$ ,  $Az_{ijr}$  — праве значення азимута з часовою прив'язкою  $\tau_r$ ,  $El_{ijl}$  — ліве значення кута місця з часовою прив'язкою  $\tau_l$ ,  $El_{ijr}$  — праве значення кута місця з часовою прив'язкою  $\tau_r$ .

В результаті отримуємо елементарний набір похибок наведення у певних метеоумовах, прив'язаний до напрямку руху антени та координат наведення, який є основою для формування матриці похибок:

$$\Delta\hat{\theta}_{jk}, Az_{\Delta\hat{\theta}_{jk}}, El_{\Delta\hat{\theta}_{jk}}.$$

На основі цих оцінок аналогічно до [2] розраховуються напрямні косинуси, які використовуються для заповнення матриці похибок та подальшого її використання системою керування радіотелескопа. З метою досягнення необхідної щільності матриці похибок виконуються тривалі автоматичні супроводження обраних радіоджерел так, щоб їхні траєкторії максимально щільно

заповнили небесну сферу в топоцентричній системі відліку радіотелескопа.

Методику автоматичного оцінювання похибок можна застосовувати як для точкових радіоджерел континуального радіовипромінювання, так і для джерел, що випромінюють молекулярні спектральні лінії (космічних мазерів). Емпіричні результати таких досліджень українським радіотелескопом РТ-32 будуть приведені в наступних публікаціях.

Розроблено відповідні програмні модулі та бібліотеки, які інтегровані в систему керування РТ-32 та легко інтегруються у програмне забезпечення керування іншими радіотелескопами.

## ВИСНОВКИ

Перші результати створення українського радіотелескопа нового покоління РТ-32 на базі антенної системи MARK-4В дозволяють стверджувати про перспективи досягнення технічних характеристик на рівні світових аналогів. При цьому амбітні наміри консорціуму українських науковців та виробників щодо забезпечення унікальності даного засобу радіоастрономічних спостережень зумовлюють виникнення нових науково-прикладних завдань, розв'язання яких має забезпечити досягнення поставленої мети.

Одним з таких завдань є забезпечення високої точності наведення антенної системи на радіоджерела. Попередні дослідження колективу авторів доводять, що хоча автоматизація процесу побудови матриці похибок підвищувала точність наведення радіотелескопу РТ-32 при цьому містила, пов'язані з роботою людини-оператора, помилки першого та другого роду.

Розроблена методика автоматичного оцінювання похибок наведення на базі синусоїдальної моделі сканування за рахунок врахування напруги на виході радіометричних приймачів усуває зазначені недоліки. Методику можна впровадити як для повноповоротних радіотелескопів, так і для радіотелескопів транзитного типу. Її можливо застосовувати для спостереження калібрувальних точкових радіоджерел континуального радіовипромінювання та космічних молекулярних мазерів. Програмні модулі та бібліотеки, розроблені на основі цієї методики, легко інте-

гуються у програмне забезпечення керування іншими радіотелескопами.

О. Ульянов та В. Захаренко дякують Вендспільському університету прикладних наук (Латвія) за підтримку цієї роботи коштами проекту “Ізр-

2020/2-0121 Joint Latvian-Ukrainian study of peculiar radio galaxy “Perseus A”.

This work partially was supported by 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”.

## 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 RT-32 на базе антенной системы MARK-4B. 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. 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 RT-32 в автоматизованому режимі. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 3. С. 66—75. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.032>.
3. Клепко В. Ю., Голець В. Л. *Гіперболоїди. Вища математика в прикладах і задачах: 2-ге вид.* Київ: Центр учбової літери, 2009. 594 с.
4. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Алексеев Є. А., Резниченко 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 RT-32 на базі антенної системи MARK-4B. 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>.
5. Ульянов О. М., Резниченко 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>.
6. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review.* New York, San Francisco, London, Sydney: McGraw-Hill Book Company, 1968.
7. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares. *Quart. Appl. Math.* 1944. № 2. P. 164—168.
8. MARK-4B. *Operation and maintenance handbook for antenna subsystem. Book 1. Part 1. Antenna structure.* NEC Corporation, Tokyo, Japan, 1986.
9. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.* 1963. № 11. P. 431—441.
10. 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).
11. *Satellite Communications Earth Station Antenna System MARK-4B.* Nippon Electric Co. Ltd, Tokyo, Japan, 1983.
12. 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).

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., Ozhinskyi 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. Vlasenko V., Mamarev V., Ozhinskyi V., Ulyanov O., Zakharenko V., Palamar M., Chaikovskiy A. (2021). Method of constructing the primary error matrix of the RT-32 radio telescope in an automated mode. *Space Sci. and Technol.*, **27** (3), 66—75. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.032>.
3. Klepko V. Yu., Golets V. L. (2009). *Hyperboloids. Higher Mathematics in Examples and Problems: 2nd edition*. K.: The study literature center.
4. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Alekseev E. A., Reznichenko O. M., Kulahin I. O., Budnikov V. V., Prisiazhnii V. I., Poikhalo A. V., Voitiuk V. V., Mamariev V. M., Ozhinskyi 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., Glamazdin O. I., Shubnyi A. O., Kyrylenko 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>.
5. 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., Ozhinskyi 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>.
6. Korn G. A., Korn T. M. (1968). *Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review*. New York, San Francisco, London, Sydney, McGraw-Hill Book Company.
7. Levenberg K. (1944). A method for the solution of certain problems in least squares. *Quart. Appl. Math.*, № 2, 164—168.
8. *MARK-4B. Operation and maintenance handbook for antenna subsystem. Book 1. Part 1. Antenna structure*. Tokyo, Japan, NEC Corporation, 1986.
9. Marquardt D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, № 11, 431—441.
10. Ozhinskyi 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).
11. *Satellite Communications Earth Station Antenna System MARK-4B*. Nippon Electric Co. Ltd, Tokyo, Japan, 1983.
12. 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).

Стаття надійшла до редакції 23.06.2021  
Після доопрацювання 21.07.2021  
Прийнято до друку 22.11.2021

Received 23.06.2021  
Revised 21.07.2021  
Accepted 22.11.2021

*V. Vlasenko*, 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. Mamarev*, Ph. D. in Engineering Science

Head of Research and Development Division

National Space Facilities Control and Test Center, Kyiv

ORCID ID: 0000-0003-2233-7432

E-mail: mamarev@spacecenter.gov.ua

*V. Ozhinskiy*, Ph. D. in Engineering Science

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. Ulyanov*, Ph. D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Head of Decameter Radio Astronomy Department

The Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

ORCID ID: 0000-0003-0934-0952

E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

*V. Zakharenko*, Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Director of the Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine

The Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

ORCID ID: 0000-0001-9977-824X

E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

*M. Palamar*, Dr. Sci. in Engineering, Professor

Head of the Instruments and Control-measurement Systems Department

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil

ORCID ID: 0000-0002-8255-8491

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

*A. Chaikovskiy*, Ph. D. in Engineering, Associate Professor

Associate Professor of the Instruments and Control-measurement Systems Department

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: chaikovskiy@gmail.com

*S. Fryz*, Dr. Sci. in Engineering, Professor

Head of the Telecommunications and Radio Engineering Department

Zhytomyr S. P. Koroliyov Military Institute, Zhytomyr

ORCID ID: 0000-0002-0684-2052

E-mail: antares69@ukr.net

#### METHOD OF AUTOMATIC CONSTRUCTION OF RT-32 RADIOTELESCOPE ERROR MATRIX. AUTOMATIC ASSESMENT OF TRACKING ERRORS

On March 15<sup>th</sup>, 2021, scientists of the National Space Facilities Control and Tests Center and the Radio Astronomical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine carried out preliminary observations with the Ukrainian new generation radio telescope RT-32 (Zolochiv, Lviv region). The extragalactic radiation of radio galaxy 3C84 (Perseus-A), masers from the galactic molecular cloud W3, radio emission of methanol maser from the galactic radio source G188.946 + 0.886 were observed and successfully recorded. Observations were performed as training in the framework of preparation for the launch of a joint Ukrainian-Latvian radio astronomy project lzp-2020/2-0121.

The results of the observations confirmed the world level of RT-32 radio telescope characteristics, the efficiency of the primary error matrix and revealed several shortcomings in the functioning of the tracking system. It was found that the primary tracking error matrix has insufficient discreteness and contains errors of the first and second types.

In the article, we present a method of automatic construction of the radio telescope error matrix according to the data of a radiometric receiver and receivers-recorders. The method of construction provides automatic processing of the obtained radiometric data. The results of verification of the developed method using the reference radio sources of different types and the elements of tracking errors' matrix by the elevation and azimuth obtained when using it are presented. The results obtained with the proposed method were included in the radio telescope control system and allowed us to increase the aiming accuracy of the RT-32 radio telescope.

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