

УДК 681.5, 621.3

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ

© Паламар Михайло¹, Поіхало Анатолій², Стрембіцький Михайло¹, Кругльов Володимир¹, 2016

¹Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя,
кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем, вул. Текстильна, 28, 46016, Тернопіль, Україна

²Національний центр управління і випробування космічних засобів,
а/с 127, в. Московська, 8, м. Київ, 01010, Україна

Запропоновано метод і розроблено методику вимірювання та оцінювання електричних параметрів великогабаритних антенних систем для надвисоких частотних діапазонів, що не були передбачені для використання на таких антенах під час їх проектування. На основі запропонованої методики проведено експериментальні дослідження і наведено результати вимірювання та метрологічної оцінки радіотехнічних параметрів двох великогабаритних антенних систем з діаметрами рефлекторів 12 м для частотних діапазонів Ka і Ku. Проаналізовано можливість використання таких антенних систем для створення сучасних систем космічного зв'язку.

Ключові слова: антенна система, діаграма направленості, космічний зв'язок, система керування, похибка наведення, ефективна площа розкриття поверхні антени.

Предложен метод и разработана методика измерения и оценки электрических параметров крупногабаритных антенных систем для сверхвысоких частотных диапазонов, которые не были предусмотрены для использования в таких антеннах при их проектировании. На основе предложенной методики проведены экспериментальные исследования и приведены результаты измерения и метрологической оценки радиотехнических параметров двух крупногабаритных антенных систем с диаметрами рефлекторов 12 м для частотных диапазонов Ka и Ku. Проанализирована возможность использования таких антенных систем для создания современных систем космической связи.

Ключевые слова: антенная система, диаграмма направленности, космическая связь, система управления, погрешность наведения, эффективная площадь раскрытия поверхности антенны.

The method of measurement and evaluation of electrical parameters a larg antenna systems for ultra-high frequency bands is developed, that were not provided for the use of such antennas by their design.

For ensure the necessary radio parameters in professional antenna systems (AS) use parabolic antenna reflectors with large diameters of 5 to 12 meters or more. The creation of such antennas require large expenditures for their production and metrological support by parameters setting. In addition many antenna systems of military-industrial complex (MIC) which used in the frequency bands up to 4 GHz require modernization during the transition to higher frequencies and metrological evaluation their electrical parameters at the facility.

The measurement of parameters of radio reflector AS large-diameter is impossible to implement by ground methods at a sufficiently high angles to avoid the influence of topography on Earth passing radio-waves. The measurement by radio astronomy method with using aircrafts with known parameters of source signal requires large expenditures and complex preparatory work. Therefore we need other complex methods.

The essence of the proposed method is to conduct multi-parameter measurement electrical parameters AC by radio astronomy method with using an unknown source signals from satellites and use the auxiliary test antenna relatively small diameter (Ø 2,4 m). First measured the electrical parameters of the auxiliary antenna, namely the width direction of the diagram, the gain coefficient, coefficient of using the surface. Then measured the same parameters of auxiliary test antenna by radio astronomy method with using an unknown source signals from satellites and finding corrective coefficients. The next step is the measurement by radio astronomy method the antenna which studied with large diameter of reflector with using the source signal from the same satellites and then recalculate parameters with using corrective coefficients.

Based on the proposed method is provided the experimental studies and the results of measurement and metrological evaluation of radio parameters of two large antenna systems with diameters of reflectors 12 meters for frequency bands Ku (11,7–12,5 GHz) and Ka (17,3–18,1 GHz).

The possibility of using such antenna systems for create a modern space communications systems is analyzed, especially for establishment of ground control station Ukrainian satellite “Lybid”. Creation of satellite stations through the use of effective technological measures, including AS TNA-57 by their upgrading would considerably reduce the cost of establishing such stations.

Key words: antenna system, diagram orientation, space communication, control system, pointing errors, the effective area of antenna aperture surface.

Вступ. Забезпечення розвитку сучасних космічних технологій в Україні є важливим чинником, що визначає стратегічне місце держави у світі. Відповідно до загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на період до 2032 р. [1] передбачено створення мережі наземних станцій приймання інформації від супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також створення і експлуатацію Національної супутникової системи зв'язку “Либідь” разом з наземною інфраструктурою, в яку входять головна і резервна наземні станції управління супутником.

У професійних антенних системах космічного зв'язку, радіомоніторингу, дистанційного зондування Землі для забезпечення передавання великих потоків інформації, напр., з підвищенням просторової роздільної здатності зображення із супутника ДЗЗ, забезпеченням більшої надійності обміну швидкісними потоками інформації у надвисокочастотних діапазонах від 8 ГГц до 20 ГГц антена повинна мати великий коефіцієнт підсилення, прямо пропорційний до коефіцієнта направленої дії антени і площі її поверхні [3]:

$$G = h \cdot K_{\text{нд}} = h \cdot \frac{4pS}{l^2}, \quad (1)$$

де h – коефіцієнт використання поверхні; $K_{\text{нд}}$ – коефіцієнт направленої дії; S – площа поверхні рефлектора; λ – довжина хвилі радіосигналу.

Ширину кута діаграми направленості на половинній потужності сигналу (рівень 3 дБ) в градусах можна з достатньою точністю оцінити згідно з [3] як:

$$\Theta_{0,5} = \frac{1,02l}{D} K_{\text{rad}2gr}, \quad (2)$$

де $K_{\text{rad}2gr}$ – коефіцієнт перетворення радіан на градуси дорівнює 57,3 град./рад.; D – діаметр рефлектора антени, м.

Для забезпечення потрібних радіотехнічних параметрів у професійних антенних системах (АС) використовують параболічні антени з великими діаметрами рефлекторів від 5 до 12 м і більше, що приводить до

значних затрат на їх виготовлення, метрологічне забезпечення, налаштування параметрів і, відповідно, до великої вартості таких антенних станцій приймання–передавання інформації.

Разом з тим, існує багато антенних комплексів ВПК, що використовувались у частотних діапазонах до 4 ГГц із застарілими радіотрактами і системами наведення, які значно легше модернізувати порівняно з виготовленням нових рефлекторів з прецизійними опорно-поворотними платформами. Щоб оцінити можливість створення нових антенних станцій супутникового зв'язку модернізацією наявних за замовленням Державного космічного агентства України (ДКАУ), ми виконали роботу з дослідження та метрологічної оцінки параметрів двох АС типу ТНА-57 з діаметрами рефлекторів 12 м та повноприводними опорно-поворотними платформами, що розміщені в структурних підрозділах Національного центру управління і випробування космічних засобів (НЦУВКЗ): Центрі контролю космічного простору (ЦККП) і Центрі приймання спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП). Такі АС проектувались для використання в мережі супутникового зв'язку “Молнія” в діапазоні частот 0,8–1,0 ГГц, або для інших подібних задач.

Метою роботи є розроблення методики вимірювання електричних параметрів великогабаритних (АС) з визначенням їх коефіцієнта підсилення, ширини діаграми спрямованості та коефіцієнта використання поверхні рефлектора АС й оцінкою можливості роботи у надвисоких частотних діапазонах, що не використовували раніше з такими АС.

Складність задачі полягає в тому, що вимірювання радіотехнічних параметрів рефлекторів АС великих діаметрів наземними методами неможливо реалізувати на прийнятно високих кутах, щоб уникнути впливу рельєфу поверхні Землі на проходження радіохвиль.

Випромінювальна антена з генератором необхідної частоти і потужності повинні встановлюватись у дальній зоні приймальної антени на відстані, яка, щонайменше, задовольняє співвідношення:

$$L_{min} \approx 2D^2/\lambda, \quad (3)$$

де D – максимальне розкриття дзеркала (діаметр рефлектора), м; λ – довжина хвилі радіосигналу.

Для вимірювання і контролю параметрів АС з діаметром рефлектора 3 м та частотного діапазону 2,4 ГГц, що використовувалась у наземній станції управління єгипетським супутником “EgyptSat-1”, збудовано вишку, висота якої понад 20 м (рис. 1).

Для АС з діаметром рефлектора 12 м у Ка-діапазоні (18–20 ГГц) мінімальна відстань до тестового генератора повинна становити не менше за 16 км. Це унеможливило проведення якісних вимірювань електричних параметрів АС наземними методами.

Вимірювання за допомогою літальних апаратів з відомими параметрами джерела сигналу потребує великих затрат і складних підготовчих робіт.

Опис методу вимірювання. Запропонований метод оснований на проведенні комбінованого поетапного двоступеневого вимірювання параметрів АС радіоастрономічним методом з використанням невідомого джерела сигналу із супутника (рис. 2) та допоміжної тестової антени порівняно невеликого діаметра (\varnothing 2,4 м), параметри якої попередньо вимірюють наземним методом (рис. 1).

Коефіцієнт підсилення антенної системи визначають за результатами вимірних діаграм направленості зі співвідношення

$$G_A = 10 \lg \left(\frac{31000}{2} \cdot \frac{q_{-3dB_{Az}} \cdot q_{-3dB_{El}}}{q_{-10dB_{Az}} \cdot q_{-10dB_{El}}} + \frac{91000}{2} \right) - h_{emp}, \quad (4)$$

де h_{emp} – коефіцієнт, що характеризує втрати в антенно-хвильовому тракті; $\theta_{xxx...}$ – ширина діаграми направленості за рівнем – 3dB та – 10dB, градусів:

$$\text{Азимут: } q_{-3dB_{Az}} = \cos El \cdot q_{-3dB_{Az_{geom}}},$$

$$q_{-10dB_{Az}} = \cos El \cdot q_{-10dB_{Az_{geom}}},$$

де $\cos El$ – косинус кута на максимум сигналу супутника за кутом місяця.

$$\text{Кут місяця: } q_{-3dB_{El}},$$

$$q_{-10dB_{El}}.$$

Як тестову антену використано невісесиметричну дзеркальну антену з еквівалентним діаметром рефлектора 2.4 м, параметри якої попередньо вимірювались наземним методом за допомогою тестового генератора. Значення коефіцієнта використання поверхні такої антени становить 0.64.

Експериментальні дослідження параметрів АС.

Для радіоастрономічних вимірювань як тестовий сигнал Ку-діапазону використано сигнал із супутника HOT BIRD 6 з координатами 13.0E, а для Ка-діапазону з італійського військового супутника SICRAL-1B (12.0E), близько розташованого до попереднього, що полегшує ідентифікацію супутників в умовах певної невизначеності прив'язки відлікових кутів пристроїв АС.

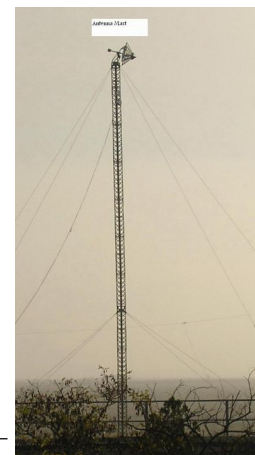
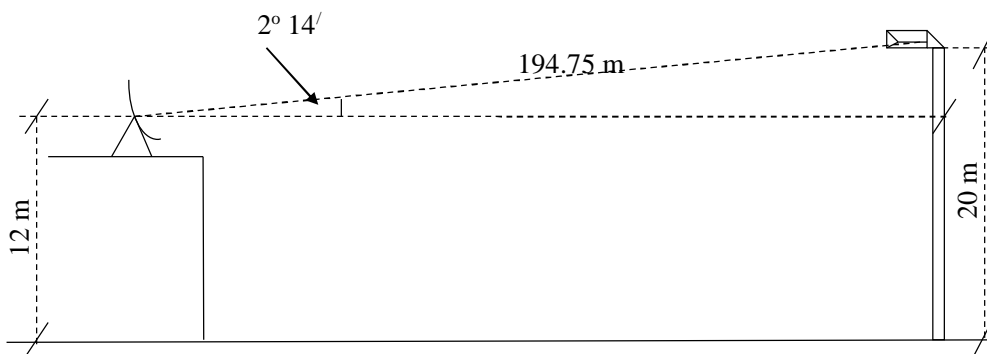


Рис. 1. Схема метрологічної перевірки АС EgyptSat-1 (\varnothing 3 м, S-діапаз. 2,4 ГГц)

Fig. 1. Scheme of metrological control AU EgyptSat-1 (\varnothing 3 m, S-band 2,4 GHz)

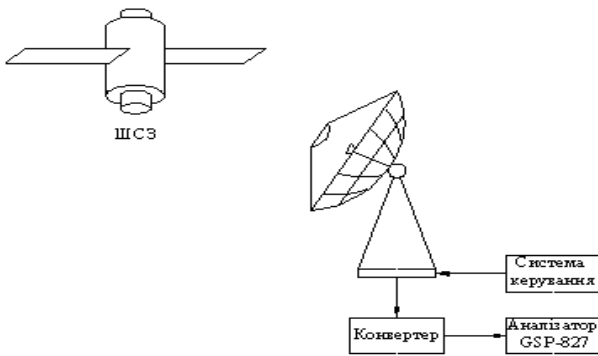


Fig. 2. Scheme of measurement DL for signal from satellites

Рис. 2. Схема вимірювання ДН за сигналом з ШСЗ

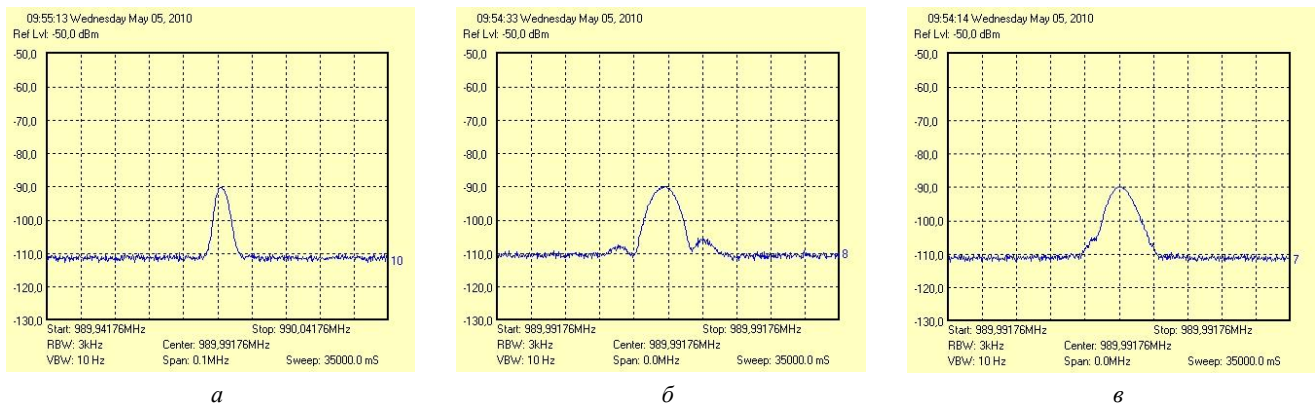


Рис. 3. Рівень сигналу (а), діаграма направленості за азимутом (б) та кутом місця (в) тестової антени

Fig. 3. Signal level (a) diagram of the azimuth orientation (b) and angle (в) of the test antenna

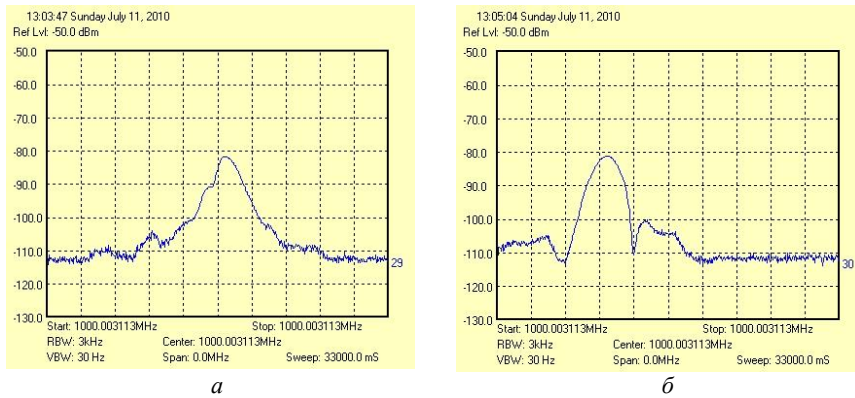


Рис. 4. Діаграми направленості АС за азимутом (а) і кутом місця (б) для однозеркальної схеми вимірювання в Ка-діапазоні

Fig. 4. Diagram of the azimuth orientation AS (a) and elevation (b) for 1-mirror circuit measurement in Ka-band

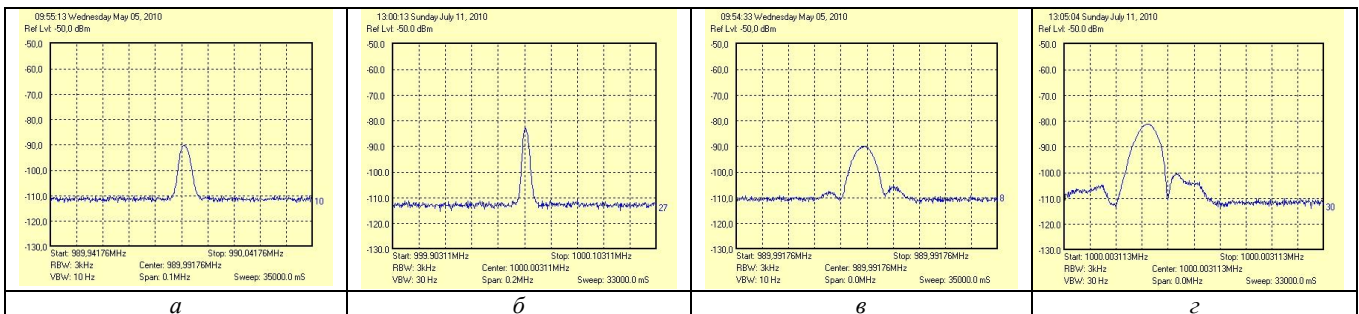


Рис. 5. Порівняння рівнів прийнятих сигналів, діаграм направленостей в Ка-діапазоні за кутом місця для тестової антени 2,4 м (а, в) та досліджуваної ТНА-57, НЦУВКЗ (б, г)

Fig. 5. Comparison of received signal, charts orientation in Ka-band in the elevation for test antenna 2.4 m (a, в) and studied TNA-57, NCCTCD (б, г)

Порівняльні результати вимірюваних параметрів двох АС

Тип АС Параметр	Ku-band (11,7 – 12,5 ГГц)			Ka-band (17,3 – 18,1 ГГц)		
	G, дБ	θ , мін.	S_{EF} , м ²	G, дБ	θ , мін.	S_{EF} , м ²
Теоретичні значення	60,98	8,8	57,0	64,97	6,0	57,0
ТНА-57КР (Зав. № 085) ЦККП НЦУВКЗ	60,3	8,6/8,0	56,5	62,8	7,0/6,8	45,2
ТНА-57КР-02 (Зав. № 19/53416904) ЦПОСІ і КНП	60,7	8,6/8,0	56,8	64,5	6,7/6,3	49,2

Результати вимірювання параметрів тестової антени з невідомими сигналами супутників наведено на рис. 3. За отриманими даними визначено:

ширину ДН тестової антени за азимутом на рівні:
– 3 дБ = 24,0°; –10дБ = 49,98°;

ширину ДН тестової антени за кутом місця на рівні:
– 3 дБ = 23,7°; –10дБ = 49,2°.

Для мінімального переобладнання вторинного радіотракту АС сигнал приймали за однозеркальною схемою за допомогою відкритого каналу хвилевода, розміщеного у фокусі рефлектора.

Координати наведення розраховували за розробленою нами програмою [4] за даними параметрів орбіт супутників (у *.TLE – форматі, із сайту <http://celestrak.com/NORAD>) та даними координат місцезнаходження АС.

Наведення на супутники здійснювалось за допомогою штатних виконавчих і відлікових пристроїв АС ТНА-57 з уточненням за допомогою квадранта оптичного КО-30М та рівнем сигналу на спектроаналізаторі.

Графіки прийнятих сигналів у Ка-діапазоні за кутом місця для тестової антени 2,4 м (а) та досліджуваної ТНА-57 (в НЦУВКЗ) наведено на рис. 5.

Порівняння рівня сигналу тестової антени (20 дБ) з діаметром рефлектора 2,4 м і ефективною площею поверхні антени $S_{EF} = 2,9 \text{ м}^2$ ($K_{EF} = 0,64$) та рівня сигналу вимірюваної антени (30,7 дБ) з діаметром рефлектора 12 м дає різницю 10,7 дБ. Водночас теоретичний приріст коефіцієнта підсилення пропорційний до відношення квадратів діаметрів рефлекторів, що порівнюються, –13,98 дБ. Різниця –3,28 дБ відповідає зниженню коефіцієнта використання поверхні з коефіцієнтом 0,469.

Порівняльні результати вимірювання і обчислення параметрів двох АС наведено в таблиці.

Висновки. Отже, отримані результати вимірювань двох антен добре корелюють з теоретичними

розрахунками і підтверджують можливість використання рефлектора АС ТНА-57 в діапазоні 18 ГГц з деяким зменшенням коефіцієнта використання поверхні (до 0,4) порівняно з Ку-діапазоном (0,5) і з теоретичним. Деякі кращі параметри отримано для АС № 2, розміщеної в ЦПОСІ і КНП, що корелює також з візуальним станом поверхні рефлектора.

У разі виготовлення оптимізованої опромінювальної системи можна забезпечити роботу в частотному діапазоні 11,7–12,5 ГГц з коефіцієнтом використання поверхні рефлектора на рівні 0,5, а в частотному діапазоні 17,3–18,1 ГГц на рівні **0,45**. Коефіцієнти підсилення відповідно становитимуть **60,7 дБ** і **64,5 дБ**.

Крім заміни ВЧ-трактів, необхідна модернізація системи керування таких АС.

Створення наземної станції управління супутником “Либідь” чи інших станцій супутникового зв’язку на основі використання наявних технічних засобів (зокрема АС ТНА-57) з їх модернізацією дало б змогу значно зменшити затрати на створення таких станцій.

1. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року. – К.: ДКА України, 2012, – 48 с. 2. Белянский П. В. Управление наземными антеннами и радиотелескопами [Текст] / П. В. Белянский, Б. Г. Сергеев – М.: Сов. радио, 1980. – 280 с. 3. Palamar M. Smart Station for Data Reception of the Earth Remote Sensing [Text] // Remote Sensing – Advanced Techniques and Platforms. – Rijeka: InTechBook, 2012. – Ch. 15. – P. 341–371. 4. Canny J. F. Finding Edges and Lines in Images / Canny J. F. – Cambridge: MIT, 1983. – 146 p. 5. Паламар М. І. Системи керування антенними станціями зв’язку з низькоорбітальними супутниками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 2013. – 36 с. 6. Lei Y. Subpixel Edge Detection Based on Morphological Theory / Y. Lei, N. Jiafa // World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS, Oct. 22–24 2008, 2008. – DOI:10.1.1.149.3399.