

**АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ СФЕРИЧНИМ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ**

*В статті проведено аналіз існуючих методів визначення характеристик антенних систем. На підставі аналізу (особливостей області застосування розглянутих методів) обґрунтовано вибір методу вимірювання характеристик та параметрів антени супутникового зв'язку. Запропоновано структуру та алгоритм функціонування вимірювального комплексу з метою визначення коефіцієнту підсилення та ефективної ізотропної випромінюваної потужності на сферичній поверхні в ближній зоні.*

*Характеристики і параметри антен, які використовуються в радіолокації, радіозв'язку, радіонавігації, як правило, наведені у дальній зоні випромінювання. Вимоги до характеристик і параметрів сучасних антен, особливо до електромагнітної сумісності цих систем, постійно зростають. Ефективне використання антенної техніки в теперішній час неможливе без розвитку та вдосконалення засобів і способів вимірювань електричних характеристик та параметрів.*

*Експериментальне дослідження характеристик антен – найважливіший технологічний процес при їх розробці та виготовленні. Результати вимірювань характеристик антен дозволяють перевірити достовірність розрахунків та моделювання, правильність вибору конструкції і матеріалів, точність виготовлення, а також відповідність вимогам щодо електромагнітної сумісності. Крім того, необхідність визначення певних характеристик обумовлена зміною конструктиву встановлення антени для забезпечення вимог електромагнітної сумісності.*

**Ключові слова:** метод вимірювання, алгоритм, антенні системи, дзеркальна антена, діаграма направленості, ближня зона, дальня зона, випромінювання, вимірювальний комплекс, сферичний сканер, коефіцієнт підсилення, ефективна ізотропна випромінювана потужність.

**Кузавков В.В., Зарубенко А.О. Алгоритм расчета характеристик антенны спутниковой связи в ближней зоне сферическим методом измерения.** В статье проведен анализ существующих методов определения характеристик антенных систем. На основании анализа (особенностей области применения рассмотренных методов) обоснован выбор метода измерения характеристик и параметров антенны спутниковой связи. Предложена структура и алгоритм функционирования измерительного комплекса с целью определения коэффициента усиления и эффективной изотропной излучаемой мощности на сферической поверхности в ближней зоне.

*Характеристики и параметры антенн, используемых в радиолокации, радиосвязи, радионавигации, как правило, приведены в дальней зоне излучения. Требования к характеристикам и параметрам современных антенн, особенно к электромагнитной совместимости этих систем, постоянно растут. Эффективное использование антенной техники в настоящее время невозможно без развития и совершенствования средств и способов измерения электрических характеристик и параметров.*

*Экспериментальное исследование характеристик антенн – важнейший технологический процесс при их разработке и изготовлении. Результаты измерений характеристик антенн позволяют проверить достоверность расчетов и моделирования, правильность выбора конструкции и материалов, точность изготовления, а также соответствие требованиям электромагнитной совместимости. Кроме того, необходимость определения определенных характеристик обусловлена изменением конструктива установки антенны для обеспечения требований электромагнитной совместимости.*

**Ключевые слова:** метод измерения, алгоритм, антенные системы, зеркальная антенна, диаграмма направленности, ближняя зона, дальняя зона, излучение, измерительный комплекс, сферический сканер, коэффициент усиления, эффективная изотропная излучаемая мощность.

**V.Kuzavkov, A.Zarubenko Algorithm for calculating satellite antenna characteristics in the near area by spherical measurement method.** The article analyzes the existing methods for determining the characteristics of antenna systems. Based on the analysis (features of the scope of the considered methods), the choice of a method for measuring the characteristics and parameters of a satellite communications antenna is substantiated. The structure and algorithm of the functioning of the measuring complex with the aim of determining the gain and effective isotropic radiated power on a spherical surface in the near zone are proposed.

*The characteristics and parameters of the antennas used in radar, radio communications, radio navigation are usually given in the far radiation zone. The requirements for the characteristics and parameters of modern antennas, especially for the electromagnetic compatibility of these systems, are constantly growing. Effective use of antenna technology is currently impossible without the development and improvement of tools and methods for measuring electrical characteristics and parameters.*

*An experimental study of the characteristics of antennas is the most important technological process in their development and manufacture. The results of measurements of the characteristics of the antennas make it possible to*

verify the accuracy of calculations and modeling, the correct choice of design and materials, manufacturing accuracy, and compliance with the requirements of electromagnetic compatibility. In addition, the need to determine certain characteristics is due to a change in the design of the antenna to meet the requirements of electromagnetic compatibility.

**Key words:** measurement method, algorithm, antenna systems, mirror antenna, radiation pattern, near field, far field, radiation, measuring complex, spherical scanner, gain, effective isotropic radiated power.

**Постановка завдання.** Завдання вдосконалення методів вимірювання характеристик антенних систем (АС) є *актуальними* та набувають особливої ваги при розробці (вдосконаленні) систем військового призначення, які повинні забезпечувати підвищену завадозахищеність, зменшення радіолокаційної помітності та виконання вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) [1].

Особливість АС, як об'єкта вимірювання обумовлена різноманіттям габаритних показників, конструктивними особливостями, характеристиками направленості, частотним діапазоном, доступними для вимірювання методами (методиками). На початковому етапі планування вимірювання – необхідно обрати метод вимірювання характеристик антени (або сукупності антен) в заданих умовах, та визначити склад і структуру вимірювального комплексу (ВК), який здатний його реалізувати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зміни в теорії і техніці антенних вимірювань відбулися на межі 80-х – 90-х років ХХ століття. В першу чергу це стосується розвитку методів і засобів вимірювання параметрів антен у ближній зоні (БЗ) випромінювання. Зростання продуктивності обчислювальних засобів дозволило здійснювати обробку великих обсягів інформації в реальному часі.

На сьогодні, для проведення антенних вимірювань розроблено ряд методів, класифікація яких наведено на рис. 1 [2 – 5].

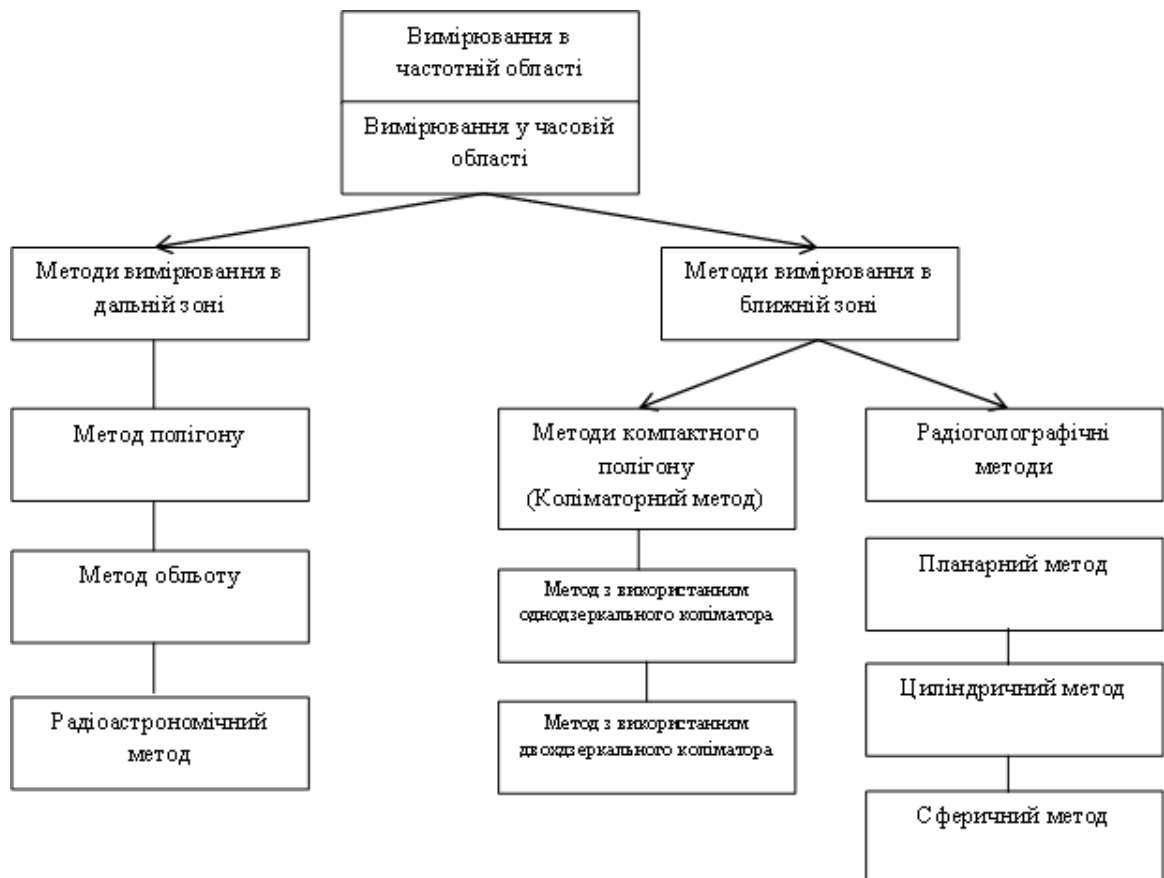


Рис. 1. Класифікація методів вимірювання характеристик антен

За типом сигналу зондування – методи поділяються на вимірювання характеристик АС в частотній та часовій областях. Сутність методів наведено нижче.

Вимірювання в частотній області – це вимірювання за допомогою монохроматичних сигналів. До складу вимірювального комплексу в даному випадку входить векторний аналізатор ланцюгів.

Вимірювання в часовій області – це вимірювання за допомогою імпульсних сигналів малої тривалості (порядку десятків-одиниць пікосекунд), що мають абсолютну ширину спектра частот порядку десятків ГГц і відносну широкосмуговість. Основу вимірювальної апаратури в цьому випадку становить генератор надкоротких імпульсів. Основною перевагою вимірювань в часовій області є можливість часової селекції шкідливих віддзеркалень. У деяких випадках це дозволяє відмовитися від використання безлунних камер і радіопоглинаючих покриттів та встановлення ВК у звичайних приміщеннях, оскільки віддзеркалення від стін, підлоги і стелі розділяються за часом з корисним сигналом.

Структуру поля випромінювання антени (основною характеристикою антени) на значній відстані (по відношенню до геометричних розмірів) є діаграма направленості (ДН). Фізичний зміст поняття дальня зона (ДЗ) полягає в тому, що досліджувана антена (ДА) знаходиться в полі плоскої хвилі. Залежно від способу формування такої плоскої хвилі розрізняють два основні методи вимірювання ДН: вимірювання в ДЗ і вимірювання в БЗ. До методів вимірювання в ДЗ [2], зазвичай, відносять – наземний полігонний, об'єктний і радіоастрономічний методи, а до методів БЗ – радіоголографічний і коліаторний [3, 4].

Вибір методу вимірювання АС зумовлений багатьма чинниками: частотний діапазон, направленість і масогабаритні параметри випробувальної антени, види і необхідна точність вимірюваних характеристик. Кожен з методів (рис. 1) вимірювання має переваги, недоліки і обмеження. Точність отримання характеристик залежить не лише від вимірювального обладнання, а й від обраного методу [5].

Як було зазначено, характеристики випромінювання АС вимірюють одним з двох методів: в ДЗ і в БЗ випромінювання [6].

Метод вимірювання в ДЗ є найбільш поширеним. Зміст методу полягає в тому, що одна з антен, зазвичай ДА, підключена до джерела, випромінює сигнал у напрямку зондової антени (ЗА). Приймач, підключений до ЗА, реєструє прийнятий сигнал. Необхідні характеристики ДА розраховуються в залежності від спільної орієнтації антен.

Даний метод вимірювання є прямим, досить простим, не вимагає складної апаратури, проте має низку недоліків:

- значні відстані між ДА і ЗА, що передбачає проведення вимірювань поза приміщеннями (на відкритій місцевості);
- істотний вплив навколишніх предметів і підстилаючої поверхні;
- залежність від погодних умов;
- неможливість виміру просторової ДН (як правило, вимірюється деякий перетин).

Значною мірою незалежними від зазначених недоліків є методи вимірювань характеристик антен в БЗ: коліаторний і радіоголографічний.

Практичне застосування знайшли три методи вимірювань характеристик антен в БЗ: на площині (планарний), на циліндричній поверхні і на сфері. Характеристики направленості антен визначаються шляхом трансформації результатів вимірювання амплітудно-фазового розподілу тангенціальних компонент вектора електричного або магнітного полів поблизу охоплюючої антену поверхні або на площині, що перевищує розмір апертури антени. Крім удосконалення обладнання, яке застосовується, підвищення точності, при вимірюванні в БЗ досягаються певними підходами. Наприклад, сканування на декількох площинах з подальшим усередненням результатів відновлення характеристик направленості – мінімізує апертурну взаємодію антен і вплив фону.

Загальні переваги вимірювань в БЗ полягають в тому, що вимірювання проводяться в приміщенні на невеликих відстанях. Для мінімізації зовнішніх впливів (погода, пасивні та

активні завади і т.д.) ДА і вимірювальна апаратура розташовуються в безлунній камері, яка представляє собою екрановане приміщення, поверхні якої покриті радіопоглинаючим матеріалом.

До недоліків можна віднести: необхідність перетворення даних; вимірювання не в реальному часі; обмеження частоти до 50 ГГц через вплив точності ЗА на вимірювальну фазу.

З точки зору антенних вимірювань найбільш універсальним є радіоголографічний метод, основою якого є прямі вимірювання амплітудно-фазового розподілу поля досліджуваної антени на деякій поверхні в безпосередній близькості від випромінюючої апертури.

Зміст методу і головний принцип полягає в тому, що інтенсивність поля випромінювання антени та його структура на різних відстанях від випромінюючої апертури – математично пов'язані. У зв'язку з цим, за вимірним полем на деякій відстані, можливо розрахунковим шляхом відновити структуру поля на будь-якій відстані від антени.

Теоретично було доведено, що вимірювання поля випромінювання антен в БЗ можливо на деякій поверхні поблизу апертури ДА. Для плоскої, циліндричної і сферичної поверхонь були запропоновані рівняння, що зв'язують структуру БЗ і ДЗ [7]. При цьому вибір тієї чи іншої поверхні визначався конструкцією ДА і структурою поля випромінювання.

Вибір траєкторії переміщення ЗА щодо ДА пов'язаний, перш за все, з переліком розв'язуваних завдань, а також з можливістю реалізації конструкції позиціонера і складністю алгоритмів обробки результатів вимірювань.

Зміст методу вимірювань передбачає штучне створення умов, в яких повинна знаходитися ДА в ДЗ. Він заснований на можливості формування поля, близького до поля плоскої хвилі, за допомогою ЗА, розташованої в безпосередній близькості від ДА та досягається двома шляхами.

Перший, при формуванні ділянки плоского фронту за допомогою ЗА – коліматора (коліматорний метод). Сутність коліматорного методу полягає в тому, що в якості вимірювального обладнання використовується спеціальна антена – коліматор. Зазвичай, це дзеркальна антена яка представляє собою несиметричну вирізку з параболоїда обертання; випромінювач, як правило, монтується так, щоб мінімізувати затінення коліматора. Розмір дзеркала перевищує розміри ДА в 1,5–2 рази. Таке дзеркало створює на відстані, близько до свого розміру, коліматорний пучок, який має плоский фазовий фронт. Похибка коліматорного методу визначається, в основному, допусками на виготовлення необхідного профілю дзеркала, які жорсткіші, ніж для звичайних дзеркальних антен, і паразитною крос-поляризацією, яку практично неможливо усунути. За операціями, що виконуються в процесі вимірювань, коліматорний метод практично не відрізняється від методу “дальної зони”, а процедура підвищення точності проведених вимірювань забезпечується вибором відповідного обладнання або схемотехнічними рішеннями.

Переваги методу: вимірювання на малих відстанях; вимірювання в реальному часі; непотрібне перетворення даних; незалежність від навколишніх впливів.

Недоліками слід вважати обмеження частотного діапазону та висока собівартість коліматора.

Другий спосіб – це синтезування ділянки плоского фронту за рахунок послідовного встановлення ЗА у вузлові точки, що розташовані на деякій поверхні поблизу ДА і вимірювання амплітуди та фази поля випромінювання в цих точках. Отримана інформація обробляється і шляхом математичних розрахунків – обчислюються необхідні характеристики (радіоголографічний метод).

Необхідно відзначити, що радіоголографічний метод найчастіше виявляється єдиним можливим методом визначення характеристик і параметрів антен з великою апертурою. Радіоголографічний метод забезпечує також вирішення низки інших важливих завдань антенної техніки: налаштування, діагностики і дефектоскопії різних АС, дослідження

профілю великих дзеркальних антен і т.д. Вимірювання в БЗ радіоголографічним методом зазвичай виконуються методами плоского, циліндричного чи сферичного сканування [7–11].

Оскільки заплановані вимірювання стосуються АС супутникового зв'язку (СЗ), то слід використовувати сферичне сканування (застосовується для антен з секторною ДН), на відміну від циліндричного та планарного (для слабонаправлених антен) [12, 13]. До особливостей сферичного сканування слід віднести можливість вимірювання ефективної ізотропної випромінюваної потужності (ЕІВП) з малим рівнем бокового випромінювання без використання еталонної антени.

Зміст циліндричного та сферичного сканування приведено на рисунку 2.

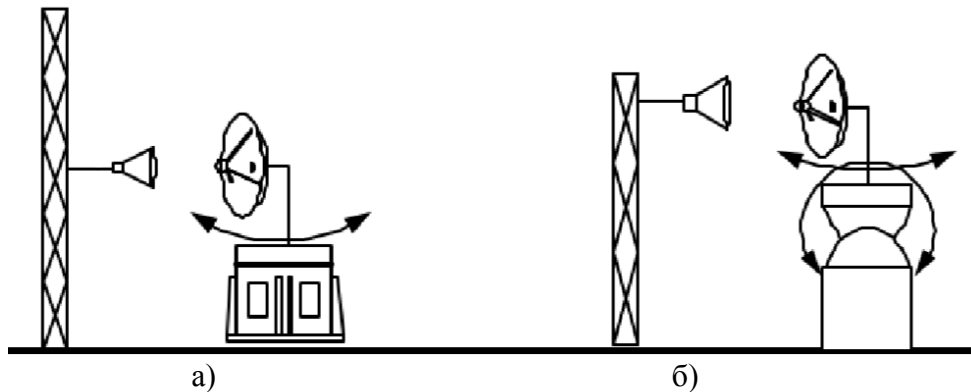


Рис. 2. Радіоголографічний метод:  
а) циліндричний; б) сферичний

Вимірювання АС в БЗ зосередженні на вимірі таких енергетичних параметрів поля, які дозволять здійснити розрахунок коефіцієнта підсилення (КП) і ЕІВП та побудувати ДН ДА. Для реалізації практичного вимірювання АС СЗ сферичним методом – запропонована структурна схема ВК (рис. 3) та розроблений детальний алгоритм його реалізації (рис. 4).

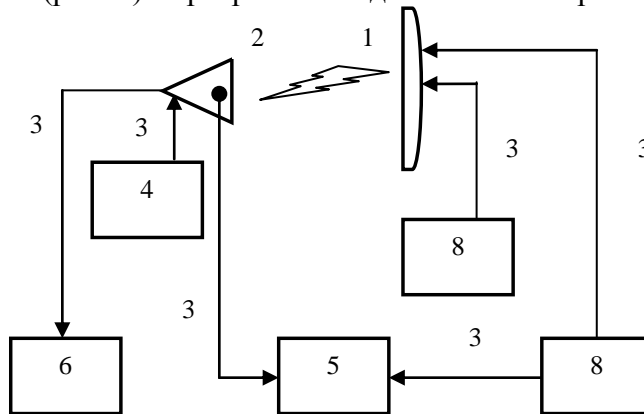


Рис. 3. Структурна схема вимірювального комплексу:

(1 – досліджувана антена; 2 – зондова антена; 3 – лінія передачі; 4 – механізм кріплення та переміщення ЗА; 5 – векторний аналізатор кіл генератора та детектора; 6 – пристрій реєстрації та детектування; 7 – генератор сигналу; 8 – механізм кріплення та повороту ДА)

**Метою** статті є: проведення аналізу методів вимірювання; визначення особливостей і області застосування, а також необхідних засобів вимірювання характеристик антен в БЗ; обґрунтування вибору методу для вимірювання АС супутникового зв'язку; створення алгоритму обробки сигналу запланованого вимірювання.

Вдосконалення алгоритму функціонування ВК в частині, що стосується розрахунку КП і ЕІВП, дозволить не використовувати еталонну антену при вимірюванні характеристик антени в БЗ (сферичний метод). Перевірка розробленого алгоритму (при проведенні

натурного експерименту) здійснюється внаслідок порівняння з результатами програмного моделювання в середовищах COMSOL Multiphysics та TICRA.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо методи обробки і обчислення, які дозволяють при вимірах АС в БЗ за допомогою сферичного сканера розрахувати КП і ЕІВП антени.

Практичної реалізації набули наступні методи: прямий, порівняння та трьох антен. Методи порівняння і трьох антен потребують проведення додаткових вимірювань розподілу поля еталонної антени, з тими ж параметрами сканування, що і при вимірюванні ДА, що відповідно збільшує час самих вимірювань [12, 14–16]. Скоротити час вимірювання більш, ніж в два рази, з урахуванням часу на установку і юстування антени, дозволяє прямий метод вимірювання КП, заснований на використанні каліброваної (еталонної) ЗА.

Способи прямого виміру КП і ЕІВП в сферичних сканерах недостатньо висвітлені в науковій літературі, теоретичні основи розглядаються в [13]. В [17] наводиться приклад вимірювання ЕІВП, виконаного за допомогою програмного забезпечення компанії TICRA.

Розглянемо більш детально алгоритм реалізації сферичного методу розрахунку ДЗ антени за вимірами у БЗ по кроках (рис. 4).

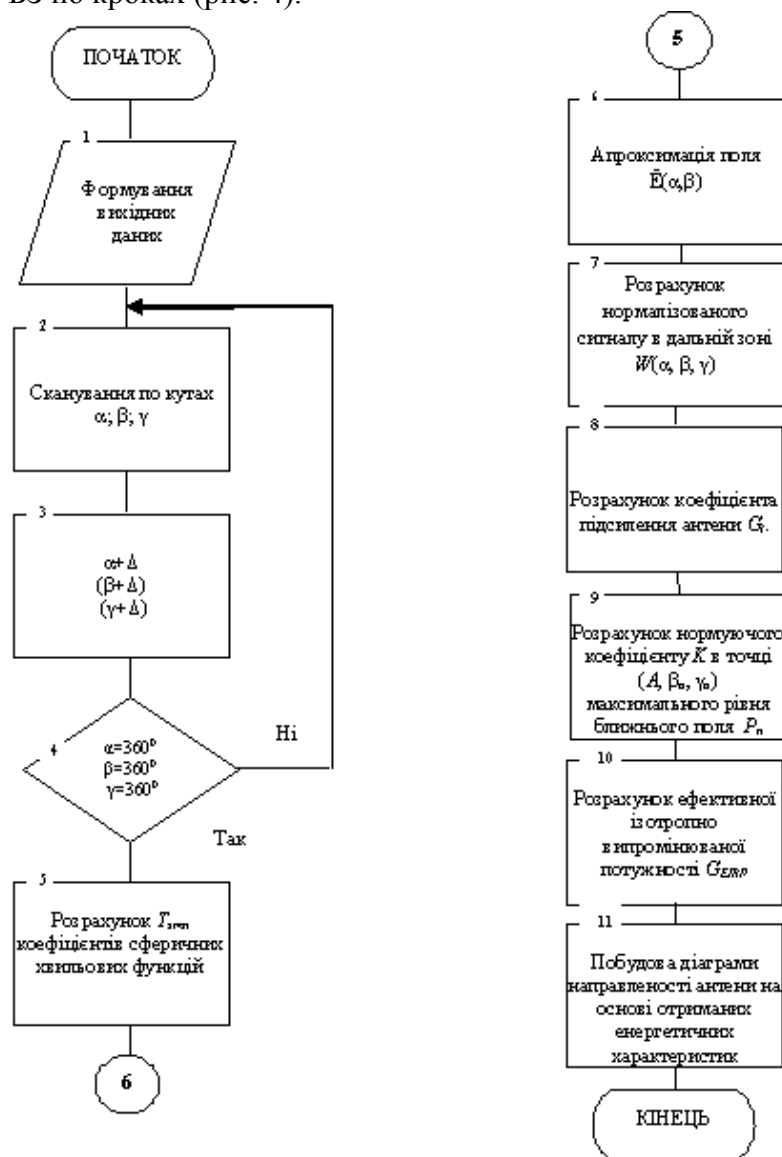


Рис. 4. Алгоритм реалізації методу визначення коефіцієнта підсилення та ефективної ізотропної випромінюваної потужності антени

При вимірюванні характеристик антени в сферичному сканері відбувається апроксимація поля  $\vec{E}(\alpha, \beta)$  сферичними хвильовими функціями  $\vec{K}_{smn}(\alpha, \beta)$ :

$$\vec{E}(\alpha, \beta) = \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n T_{smn} \vec{K}_{smn}(\alpha, \beta), \quad (1)$$

де  $T_{smn}$  – коефіцієнти сферичних хвильових функцій;  $s$  – індекси поляризації;  $n$  – полярний індекс, що відповідає куту  $\alpha$ ;  $m$  – азимутальний індекс, що відповідає куту  $\beta$ ;  $N$  – число сферичних гармонік, використуваних для апроксимації ДН. Наразі, коефіцієнти сферичних хвильових функцій  $T_{smn}$  підлягають визначенню.

Вихідними даними для визначення коефіцієнтів  $T_{smn}$  є вимірювання поля  $w(A, \alpha, \beta, \gamma)$  на сфері радіуса  $A$  при скануванні по кутах  $\alpha, \beta$  і обертанні ЗА по куту  $\gamma$  (крок 2). Вимірювання поля здійснюється в окремих точках сфери в діапазоні від  $0^\circ$  до  $360^\circ$  для кожного з кутів (крок 3, 4).

Принцип геометрії сканування за кутами ЗА поля навколо ДА зображено на рис. 5.

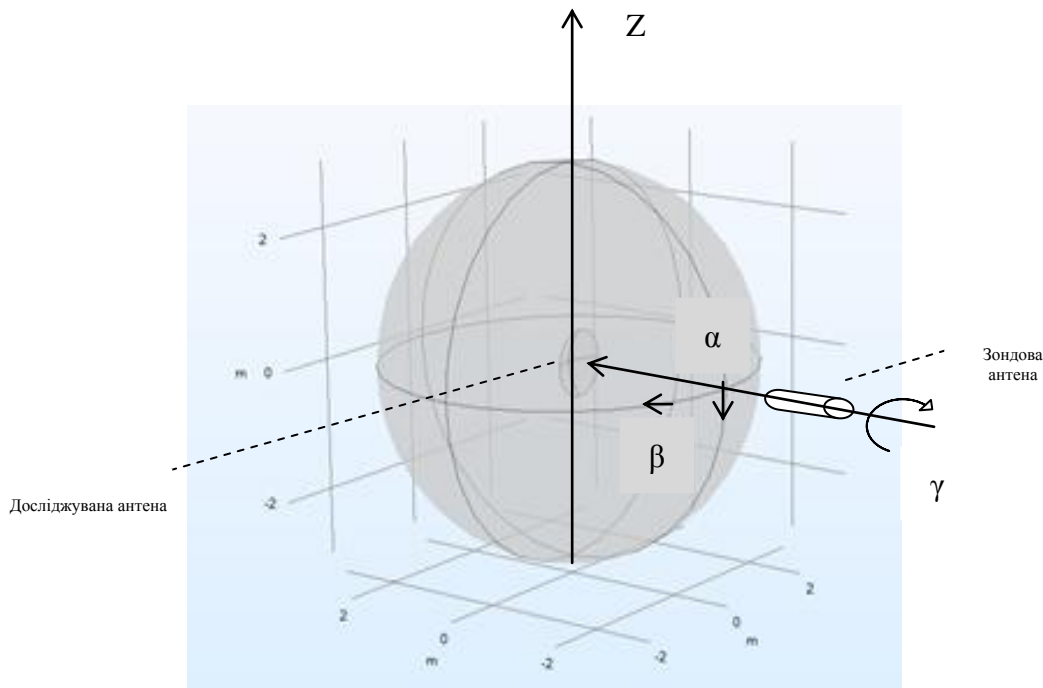


Рис. 5. Геометрія проведення вимірювання антени в сфері (сферичне сканування)

Коефіцієнти  $T_{smn}$  визначаються з рівняння спостереження (крок 2) [13]:

$$w(A, \alpha, \beta, \gamma) = \nu \sum_{\substack{smn \\ \sigma\mu\nu}} T_{smn} e^{jm\beta} d_{\mu n}^n(\alpha) e^{j\mu\gamma} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p, \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{smn \\ \sigma\mu\nu}} = \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n \sum_{\sigma=1}^2 \sum_{\mu=-V_{\max}}^{V_{\max}} \sum_{\nu=|\mu|}^{V_{\max}},$$

де  $\nu$  – вхідний сигнал ДА (розглядаємо вимір при роботі ДА в режимі випромінювання);  $d_{\mu n}^n(\alpha)$  – коефіцієнти, що характеризують перетворення системи координат при переміщенні ЗА по куту  $\alpha$ ;  $R_{\sigma\mu\nu}^p$  – коефіцієнти сферичних хвильових функцій ЗА;  $C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA)$  – визначає перетворення коефіцієнтів  $R_{\sigma\mu\nu}^p$  з початку системи координат на сферу радіуса  $A$ ; індекси  $\sigma, \mu, \nu$  аналогічні індексам  $s, m, n$  стосовно ЗА.

Шляхом послідовного інтегрування вихідних даних по кутах  $\alpha, \beta, \gamma$ , з урахуванням перетворення системи координат, рівняння (2) зводиться до системи рівнянь виду (3) щодо невідомих  $T_{1mn}$  і  $T_{2mn}$  (крок 3):

$$vT_{1mn} P_{1,mn}(kA) + vT_{2mn} P_{2,mn}(kA) = W_{\mu mn}^n(A), \quad (3)$$

де  $P_{s,mn}(kA) = \frac{1}{2} \sum_{\sigma\mu\nu} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p$ , характеристика ЗА на сфері радіуса  $A$ ;  $W_{\mu mn}^n(A)$  – результат інтегрування поля на сфері.

Процедура вимірювання і алгоритм обробки істотно спрощуються при використанні ЗА, яка відповідає умові  $\mu = \pm 1$ . Такими ЗА є, наприклад, електричний диполь або конічний рупор. Для ЗА з  $\mu = \pm 1$  досить виконати вимір БЗ при двох положеннях: однопортової лінійно-поляризованої ЗА по куту  $\gamma: \gamma = 0^\circ, \gamma = 90^\circ$ , що природним чином відповідає вимірюванню  $\alpha$ -й і  $\beta$ -й компонент поля.

Рівняння (3) для  $\mu = \pm 1$  зводиться до системи з двох рівнянь:

$$vT_{1mn} P_{1,mn}(kA) + vT_{2mn} P_{2,mn}(kA) = W_{1m}^n(A); \quad (4)$$

$$vT_{1mn} P_{1,-1,mn}(kA) + vT_{2mn} P_{2,-1,mn}(kA) = W_{-1m}^n(A).$$

Після рішення системи рівнянь (4) (крок 4), щодо  $T_{1mn}$  і  $T_{2mn}$  ДЗ розраховується відповідно до (1). Пряме вимірювання КП. Після визначення коефіцієнтів  $T_{1mn}$  і  $T_{2mn}$  може бути безпосередньо розрахований КП АС. Для розрахунку КП використовується еквівалентна форма формули Фрісса, отримана в [13] у вигляді:

$$\frac{\frac{1}{2}|w|^2}{\frac{1}{2}|v|^2} = \frac{G_p G_t}{4}, \quad (5)$$

де  $G_p$  – КП еталонної ЗА;  $G_t$  – КП ДА;  $v$  – сигнал на вході ДА;  $w$  – нормалізований сигнал в ДП [13], який визначається, як:

$$W(\alpha, \beta, \gamma) = \lim_{kA \rightarrow \infty} \left[ w(A, \alpha, \beta, \gamma) \frac{kA}{e^{jkA}} \right]. \quad (6)$$

Крок 5. Нормалізований сигнал (6) обчислюється на основі рівняння спостереження (2), як сигнал нескінченно віддаленої ЗА:

$$W(\alpha, \beta, \gamma) = v \sum_{\substack{smn \\ \mu=\pm 1}} T_{smn} e^{jm\beta} d_{1mn}^n(\alpha) e^{jmy} P_{s,mn}^\infty. \quad (7)$$

На нескінченному віддаленні від ДА будь-яка ЗА, з точки зору своїх направлених властивостей, може розглядатися, як електричний диполь.

Тому в якості характеристики зонда  $P_{s,mn}^\infty$  в (7) використовуємо характеристику електричного диполя в дальній зоні [13]:

$$P_{s1n}^\infty = -\frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1};$$

$$P_{s,-1,n}^\infty = (-1)^s \frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1}.$$

Крок 6. Після розрахунку, згідно (7), нормалізованого сигналу ДЗ  $w(\alpha, \beta, \gamma)$ , КП  $G_t$  визначається з рівняння (5):

$$G_t(\alpha, \beta) = \frac{4}{G_p} \frac{|W(\alpha, \beta)|^2}{|v|^2}.$$

Приступимо до прямого вимірювання ЕІВП (крок 7). БЗ на сфері вимірюється відносно заданого рівня вхідного сигналу  $v$  з точністю до деякої постійної величини  $c$ , яка визначається ослабленням приймально-передавального тракту. Оскільки алгоритм



перетворення даних БЗ  $cW$  в ДЗ – лінійний, отриманий сигнал ДЗ  $cW$  відомий з точністю до тієї ж постійної величини. Константа  $c$  визначається в ході калібрування приймально-передавального тракту шляхом вимірювання загасання сигналу між портами векторного аналізатора ланцюгів (рис. 3, елемент 5) при прямому з'єднанні входу ДА і виходу ЗА.

Відповідно до визначення, ЕІВП, що використовуються в [13]:

$$G_{EIRP} = \frac{1}{2} |v|^2 G_t.$$

Тоді (5) можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{2} |W|^2 = \frac{G_{EIRP} G_p}{4}. \quad (8)$$

Вимірювання абсолютного рівня потужності  $P_m$  в точці  $(A, \alpha, \beta)$ , яка відповідає максимальному рівню БЗ.

Отримане значення необхідно нормувати відносно калібрувального коефіцієнта  $K$  який дозволяє зв'язати відносний рівень розподілу поля БЗ на сфері з його абсолютною потужністю  $P_m$  в деякій точці  $(A, \alpha_m, \beta_m)$  (рис. 6):

$$K = \frac{P_m}{\frac{1}{2} |w(\alpha_m, \beta_m)|^2}.$$

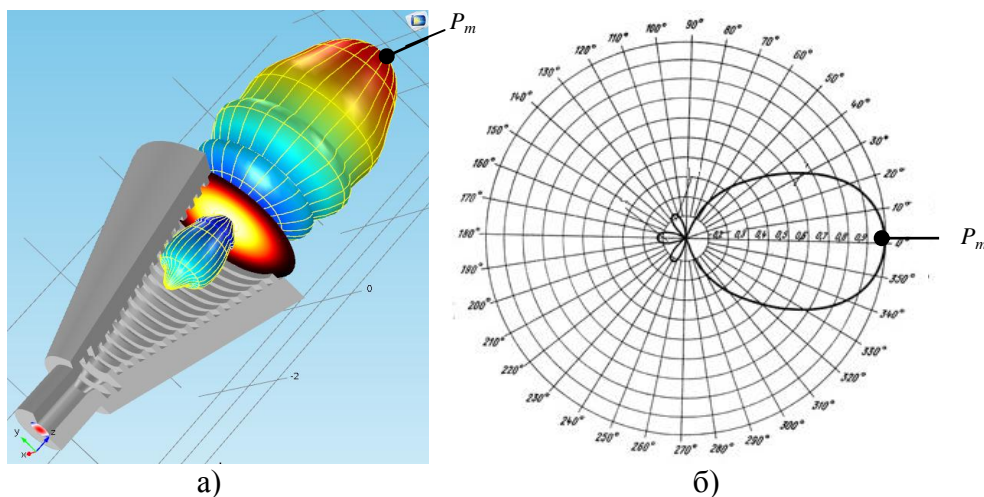


Рис. 6. Абсолютний рівень потужності ( $P_m$ ):  
а) 3D-модель в програмному середовищі; б) в горизонтальній площині ДН

Крок 8. Нормалізований сигнал ДЗ  $w(\alpha, \beta, \gamma)$  розраховується згідно (7) без врахування впливу приймально-передавального тракту. ЕІВП визначається з рівняння (8) з урахуванням каліброваного коефіцієнта (9):

$$G_{EIRP}(\alpha, \beta) = \frac{2K}{G_p} |W(\alpha, \beta)|^2. \quad (9)$$

Крок 9. Реалізувавши кроки алгоритму прямого розрахунку КП і ЕІВП безпосередньо за вимірюваннями БЗ ДА на сферичній поверхні, без використання еталонної антени, – виконується побудова ДН. Аналітична частина запропонованого алгоритму дозволяє виконувати побудову ДН при моделюванні в програмному середовищі.

**Висновки.** Запропоновано алгоритм розрахунку коефіцієнту підсилення та ефективної ізотропної випромінюваної потужності безпосередньо за вимірюваннями ближньої зони антени супутникового зв'язку на сфері.

Створено аналітичний та методичний апарат для перевірки запропонованого алгоритму при програмному моделюванні в середовищах: COMSOL Multiphysics і TICRA. Особливість

запропонованого алгоритму проведення вимірювання антени в сфері полягає у створенні підходів, які забезпечують можливість експериментального дослідження характеристик випромінювання різнотипних антен у широкій смузі частот в умовах безлунної камери.

Технічні рішення і методика вимірювань дозволяють підвищити точність і достовірність експериментальних досліджень характеристик антен.

**Напрямок подальшого дослідження** є реалізація математичного моделювання, оцінка теоретичних і чисельних результатів, отриманих за допомогою обчислювального алгоритму із застосуванням середовищ програмного моделювання COMSOL Multiphysics і TICRA при вимірюванні АС СЗ в діапазоні частот 20.00–40.00 ГГц.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кузавков В.В., Зарубенко А.О. Оцінка можливості зміни конструктиву встановлення та налаштування антен супутникового зв'язку // Збірник наукових праць/Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист: Київ, ДУ ІГНС НАН України, Вип. 1(7), 2017, стор. 69 – 74.
2. Evans G. Antenna measurement techniques. – Artech House Inc., London, 1990.
3. Бахрах, Л. Д. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин и др. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
4. Методы измерения характеристик антен СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др.; под ред. Н. М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
5. Near-field vs Far-field. (Reprinted with the permission of Nearfield Systems Inc.) [електронний ресурс] // <http://educyclopedia.karadimov.info/library/NSI-near-far.pdf>.
6. Fordham, J.A. An introduction to antenna test ranges, measurements and instrumentation (Microwave Instrumentation Technologies, LLC) / [електронний ресурс] // <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.112.9981&rep=rep1&type=pdf>.
7. Yaghjian, A.D. Efficient computation of antenna coupling and fields within the near-field region. / A.D. Yaghjian. // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. AP-30, № 1. – P. 113.
8. Slater, D. Near-field antenna measurements. / D. Slater. // Artech House Inc. –1991. – P. 310.
9. Antenna Measurement Theory. Introduction to Antenna Measurement [електронний ресурс] // [https://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/ORFR-Theory.pdf](https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/ORFR-Theory.pdf)
10. Near Field Antenna Measurement Theory, Planar, Cylindrical and Spherical [електронний ресурс] // [http://nearfield.com/aboutus/documents/Nearfield\\_Antenna\\_Test\\_Theory.pdf](http://nearfield.com/aboutus/documents/Nearfield_Antenna_Test_Theory.pdf).
11. Said M. Mikki and Yahia M. Antar A Theory of Antenna Electromagnetic Near Field – Part I // Article (PDF Available) in IEEE Transactions on Antennas and Propagation 59(12):4691-4705 · December 2011
12. Parini C., Gregson S., McCormic J., Daniel J. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements (Electromagnetic waves series, v.55). – Institution of Engineering and Technology, London, 2015.
13. Hansen J. Spherical near-field antenna measurements theory and practice (Electromagnetic waves series, v.26). – Institution of Electrical Engineers, London, 1988.
14. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне/ Бахрах Л.Д. и др. – Л.: Наука, 1985.
15. Newell A., Ward R., McFarlane J. Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.36, № 6, 1988.
16. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements // Antenna Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society, IEEE Std 1720 – 2012.
17. Doren W. Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning // Antenna Measurements and SAR, 2004. AMS 2004. IEEE.