

Данильченко Валентина Миколаївна

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ORCID: 0009-0004-6839-2132

Отрох Сергій Іванович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ

ORCID: 0000-0001-9008-0902

Кублій Лариса Іванівна

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ

ORCID: 0000-0002-1015-3209

Гасанов Ельдар Ігорович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ

ORCID: 0009-0003-4409-6593

МЕТОДИКА ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПАСИВНОЇ ПЕЛЕНГАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ

Анотація: Стаття присвячена покращенню точності та стійкості до збоїв методу пасивної пеленгації через застосування методики калібрування антен. Пасивні пеленгаційні системи широко використовуються в радіомоніторингу, радіоелектронній боротьбі, навігації, цивільних і військових системах зв'язку, а також у радіоелектронній розвідці. Їх ефективність залежить від точності роботи, а також стійкості до зовнішніх впливів, включно з перешкодами та шумами.

У статті розглядається метод порівняння амплітуд, який є одним із найпоширеніших способів визначення напрямку на джерело сигналу. Цей метод базується на вимірюванні амплітуд сигналів, що приймаються декількома антенами, розташованими під певними кутами, і подальшому аналізі цих значень. Однак, через зовнішні фактори, такі як неоднорідність середовища розповсюдження сигналу або взаємний вплив антен, можуть виникати похибки, які знижують точність системи.

У роботі запропоновано методику калібрування антен, яка дозволяє мінімізувати вплив зазначених факторів. Описано процес автоматичного калібрування, зокрема використання рупорної еталонної антени, аналізатора спектру та генератора надвисоких частот. Запропоновано алгоритм збору та обробки даних амплітудних характеристик для побудови таблиці калібрування, яка нормалізує амплітудні співвідношення та забезпечує точне визначення напрямку на джерело сигналу.

Запропонований підхід підвищує надійність пасивних пеленгаційних систем та забезпечує їх ефективну роботу в умовах впливу зовнішніх факторів, що є критично важливим у військових і цивільних сферах застосування.

Ключові слова: пасивна пеленгація, антенні системи, автоматизація, калібрування, інформаційні технології.

Danylchenko Valentyna

State University of Telecommunications and Information Technologies, Kyiv

ORCID: 0009-0004-6839-2132

Otrokh Serhii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

ORCID: 0000-0001-9008-0902

Kublii Larisa

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

ORCID: 0000-0002-1015-3209

Hasanov Eldar

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

ORCID: 0009-0003-4409-6593

THE METHOD OF IMPROVING THE ACCURACY OF PASSIVE FINDING WITH THE HELP OF AUTOMATIC CALIBRATION OF ANTENNA SYSTEMS

The article focuses on improving the accuracy and fault tolerance of the passive direction-finding method through antenna calibration. Passive direction-finding systems are widely used in radiomonitoring, electronic warfare, navigation, civilian and military communication systems, as well as in electronic intelligence. Their effectiveness depends on the accuracy of operation and resilience to external factors, including interference and noise.

The paper examines the amplitude comparison method, which is one of the most common approaches for determining the direction of a signal source. This method is based on measuring the amplitudes of signals received by several antennas positioned at specific angles and subsequently analyzing these values. However, due to external factors such as inhomogeneities in the signal propagation medium or mutual antenna interference, errors may occur, reducing system accuracy.

The study proposes an antenna calibration methodology to minimize the influence of these factors. The process of automatic calibration is described, including the use of a standard horn antenna, a spectrum analyzer, and a high-frequency signal generator. An algorithm for collecting and processing amplitude characteristic data is proposed, which allows for the construction of a calibration table that normalizes amplitude ratios and ensures accurate determination of the signal source direction.

The proposed approach enhances the reliability of passive direction-finding systems and ensures their efficient operation under the influence of external factors, which is critically important in both military and civilian applications.

Keywords: *passive direction finding, antenna systems, automation, calibration, information technology.*

1. Вступ

Для виявлення напрямку випромінювача використовуються різні методи пеленгації, які дозволяють виявити джерело випромінювання радіо-електронної хвилі.

Це широко застосовується у таких у таких сферах, як радіомоніторинг, системи радіоелектронної боротьби, навігація, у цивільних і військових системах зв'язку, а також радіо-технічна, радіо-електронна та радіо розвідка. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від їх точності і здатності протистояти зовнішнім впливам, зокрема перешкодам, збоям у роботі, засобам поставлення радіо-перешкод, а також взаємному впливу всередині АФС, через відбиття сигналу від поверхні сусідніх антен.

Об'єктом дослідження є процес пасивної пеленгації, який здійснюється без активного випромінювання сигналу з боку пеленгатора.

Пасивні пеленгаційні системи мають перевагу в умовах, де необхідно уникати виявлення, що робить їх незамінними у військових операціях та в цивільному застосуванні в умовах ведення активних бойових дій.

Такі системи також піддаються впливу зовнішніх факторів, що можуть знижувати їхню точність і надійність, що є не припустимо зважаючи на умови використання таких систем.

Предметом дослідження є метод порівняння амплітуд, який є одним із найбільш поширених методів пеленгації.

Цей метод базується на вимірюванні амплітуди сигналу, що приймається декількома антенами, розташованими на певній відстані, під певним кутом, і на подальшому порівнянні цих значень для визначення напрямку на джерело сигналу. Метод порівняння амплітуд є простим і ефективним у теорії, але на практиці він може страждати від збоїв через різні фактори, такі як неоднорідність простору поширення сигналу та вплив шумів[1].

Метою роботи є покращення точності і стійкості до збоїв методу пасивної пеленгації за допомогою калібрування антен.

Правильне калібрування антен дозволяє мінімізувати похибки, викликані неоднорідністю в характеристиках антен або в умовах прийому сигналу. Це особливо важливо для систем, які працюють у складних умовах, де точність пеленгації має вирішальне значення для безпеки людей. Запропонований підхід до калібрування може підвищити надійність пасивних пеленгаційних систем і забезпечити більш точне визначення напрямку випромінювача в реальних умовах експлуатації.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Проблема точного визначення напрямку на джерело випромінювання є актуальною для багатьох областей, таких як радіоелектронна розвідка, навігація, радіомоніторинг та системи управління. Особливо це стосується пасивної пеленгації[1-3], де необхідно отримувати точну інформацію про положення випромінювача. У таких системах важливим аспектом є стійкість до зовнішніх впливів, зокрема перешкод, збоїв і похибок у вимірюваннях, що можуть виникати через особливості приймальних антен і конструкцією АФС.

Метод порівняння амплітуд є одним із найпоширеніших підходів до пасивної пеленгації[1,2]. Його суть полягає у вимірюванні амплітуди сигналів, які приймаються декількома антенами, розташованими у просторі. Порівнюючи ці амплітуди, можна визначити кутове положення джерела випромінювання. Однак цей метод має свої недоліки, зокрема залежність від характеристик прийому, що можуть змінюватися під впливом зовнішніх умов[3]. Ці фактори можуть призвести до значних похибок у визначенні напрямку, що ускладнює роботу пеленгаційних систем.

Для вирішення цих проблем необхідно розробити методику покращення точності методу пасивної пеленгації, що ґрунтується на калібруванні антен. Правильне калібрування дозволить зменшити похибки, що виникають через індивідуальні відмінності в характеристиках антен або через їхній взаємний вплив. Використання ефективних алгоритмів калібрування допоможе покращити стійкість системи до збоїв і забезпечить стабільні результати навіть у складних умовах прийому сигналів.

Задача покращення точності методу пасивної пеленгації полягає в розробці системи калібрування антен[4]. Це дозволить мінімізувати вплив зовнішніх факторів та забезпечити точне визначення напрямку на джерело сигналу

Розроблений підхід має включати процедури автоматичного калібрування. Це дозволить покращити надійність пеленгаційних систем, знизити похибки вимірювань і забезпечити більш точне визначення положення випромінювача, що має важливе значення для широкого спектра прикладних завдань.

3. Огляд літератури

Амплітудні методи пеленгації базуються на тому що діаграма спрямованості антени еквівалентна просторовому фільтру, тобто вона забезпечує кутове розрізнення вхідного сигналу, зважаючи його інтенсивність з різним посиленням для кожного кута прибуття [4-8].

Пеленг на випромінювач оцінюється шляхом проведення диференціальних вимірювань, які можна зробити:

1. в одному імпульсі між сигналами, прийнятими одночасно променями кількох антен
2. між сигналами, отриманими протягом часу кількома послідовними імпульсами між положеннями, прийнятими за час
 - a. обертовий промінь однієї антени
 - b. скануючий промінь однієї антени

вимірювання як у випадку 1 називається моноімпульсним: кілька каналів, кожен з яких пов'язаний з антеною пеленгації, розподілені в просторі, щоб охоплювати 360° азимуту (або потрібний сектор азимуту), забезпечують одночасні вимірювання елементарних параметрів, які, складені разом із певними алгоритмами, дозволяють оцінити пеленг на випромінювач[9,10].

Інший тип вимірювання також називається моноімпульсним, але його не слід плутати з попереднім: воно здійснюється через формування на рівні антени різниці амплітуд/фаз та використання 2/3 фізичних каналів для обробки дельта-каналів і сумового каналу[11].

4. Система калібрування

Система калібрування розроблена на базі платформи C# . NET і поєднує кілька компонентів для точного вимірювання антенних характеристик.

У процесі використовуються рупорна еталонна антена ПБ-23А діаграма направленості надана на рисунку 1 та генератор надвисоких частот RIFOL DSG3136B, керований комп'ютером. Аналізатор спектру Keysight FieldFox фіксує амплітудні характеристики сигналу від антени, яка калібрується. Випромінююча частина схеми знаходиться на відстані мінімум 17 метрів від прийомного тракту, з урахуванням перших трьох зон Фрінеля.

Калібрування виконується шляхом поетапного оберту антени, на 1° градус. Після кожного оберту дані сигналу знімаються аналізатором спектру і записуються в базу даних для подальшої обробки. Основна задача системи на цьому етапі — зібрати амплітудні показники для різних кутів і на основі цих даних в подальшому побудувати таблицю калібрування.

Дані з таблиці калібрування використовуються для нормалізації амплітудних співвідношень, виміряних у децибелах, і переведення їх у відповідні кути. Це дозволяє прогнозувати напрям випромінювання на основі реальних вимірювань, враховуючи вплив зовнішніх факторів, індивідуальних характеристик антен і індивідуальних характеристик АФС, таких як не однорідність у підсилювачах чи фільтрах.

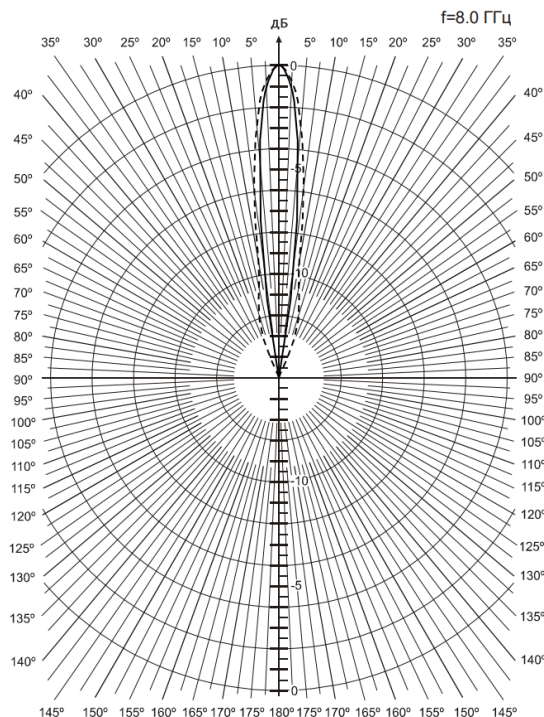


Рис. 1. Діаграма спрямованості антени П6-23А

Антенна система яка заміряється представляє собою систему антен, які повернуті у просторі відносно одна одної на 90 градусів у горизонтальній площині. Після кожної антени стоїть відповідний каскад фільтрів, підсилювачів, дільників і комутаторів, які забезпечують правильну фільтрацію і обробку сигналу, а також правильний його вивід на вихідні НВЧ роз'єми.

Для пеленгації використовується наступна методика: нехай знята амплітуда з двох антен які знаходяться поруч це проекція відповідного сигналу на дві центральні осі двох, поруч стоячих антен. Тоді, ми можемо представити вектор направлення на джерело випромінювання як суму, двох векторів, які направлені вздовж осей антен, і в сумі дають шуканий вектор. В загальному вигляді ця задача представлена на рисунку 2.

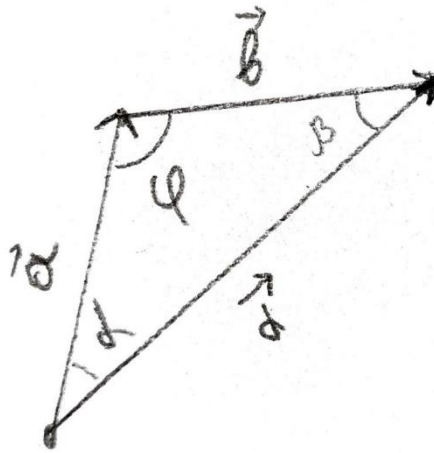


Рис. 2. Загальний вигляд задачі пошуку вектора направлення.

З цього, використавши теорему синусів (формула 1) ми можемо вивести формулу 2 для знаходження кута α .

$$\frac{|\vec{a}|}{\sin(\beta)} = \frac{|\vec{b}|}{\sin(\alpha)} = \frac{|\vec{d}|}{\sin(\varphi)} \quad (1)$$

Формула 1 – теорема синусів.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|\vec{a}| \cdot \sin(\varphi)}{|\vec{d}|}\right) \quad (2)$$

Формула 2 – формула кута α

Для спрощення знайдемо модуль вектора d , за допомогою теореми косинусів формула 3. Підставивши це у формулу 2, знайдемо формулу 4, оскільки кут $\varphi = 90$ градусам, то $\cos(\varphi) = 0$, $\sin(\varphi) = 1$, підставивши ці значення у формулу 4, отримуємо формулу 5. І з неї формула 6 – пеленгаційні характеристики двох антен для нашої моделі.

$$|\vec{d}| = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 - 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos(\varphi) \quad (3)$$

Формула 3 – модуль вектора d за теоремою косинусів

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|\vec{a}| \cdot \sin(\varphi)}{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 - 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos(\varphi)}\right) \quad (4)$$

Формула 4 – загальний випадок формули кута α

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|\vec{a}|}{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2}\right) \quad (5)$$

Формула 5 – кінцева формула кута альфа, для антен які знаходяться під 90 градусів одна до одної.

$$\frac{|\vec{a}|}{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2} \quad (6)$$

Формула 6 – пеленгаційні характеристики двох антен для нашої моделі.

Оскільки в нашому випадку використовуються не ідеальні антени, для більш точного визначення кута в кінцевому випадку буде використано апроксимацію по поліному високого порядку, і замість арксинуса буде використана функція оберненого полінома, це дозволить збільшити точність розрахунків.

Відповідно для вирішення задачі оптимізації для кожної пари антен, треба апроксимувати відповідні співвідношення і використовувати знайдені коефіцієнти, як калібраційні для кожної пари антен. Розраховані пеленгаційні характеристики пар антен за формулою 6 представлені на рисунку 3.

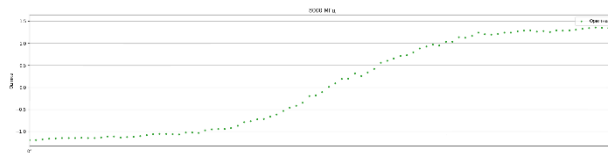


Рис. 3. Графік пеленгаційних характеристик двох пар антен.

По отриманим даним апроксимовано поліном і побудовано графік максимальних похибок на кут, який представлено на рисунку 4. Він демонструє, що поліноміальний підхід забезпечує достатньо точні результати, що підтверджує його доцільність для використання у розрахунках.

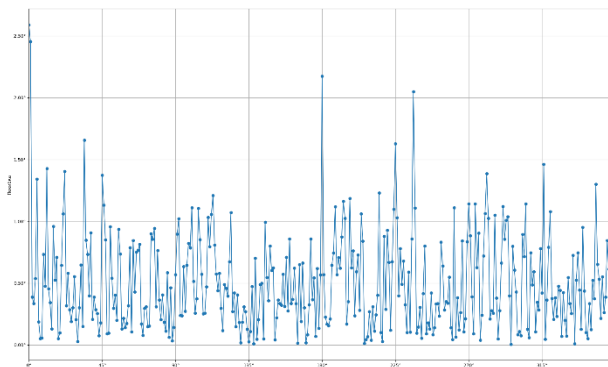


Рис. 4. Графік помилок оцінки кута.

Додатково було проведено тестування на різних кутових положеннях антен, що дозволило оцінити вплив різних факторів на точність вимірювань. Отримані результати також свідчать про стійкість поліноміального методу до невеликих відхилень у характеристиках сигналу, що ще більше підкреслює його ефективність у контексті пеленгаційних систем.

5. Висновки

Виходячи з вищевикладеного можна зробити такі висновки:

1. Розроблена методика калібрування антен на основі порівняння амплітудних значень дозволяє підвищити точність визначення напрямку на джерело сигналу на 11% в тому числі у складних умовах прийому.

2. Використання поліноміальної функції для нормалізації амплітудних співвідношень забезпечує найвищу точність серед проаналізованих функцій, що доведено експериментально.

3. Запропонована система калібрування є ефективною для використання в пеленгаційних системах різного призначення, включаючи військові та цивільні застосування.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні алгоритмів калібрування та впровадженні паралельних методів обчислення для підвищення продуктивності системи в умовах реального часу.

Список використаної літератури

1. Lee J. -H., Kim J. -K., Ryu H. -K., Park Y. -J. Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018, Vol. 17, no. 4, Pp. 563-566.
2. Li J., Zhang Q., Deng W., Tang Y., Zhang X., Wu Q. Source Direction Finding and Direct Localization Exploiting UAV Array With Unknown Gain-Phase Errors. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022, Vol. 9, no. 21, Pp. 21561-21569.
3. He W., Zhou Q., Zhang X., Zhao Y., Li B., Zhang L. Research on direction finding of UAV coherent signals based on uniform circular array. 2022 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS): Proceedings 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS) (Chengdu 16-18 December 2022). China, 2022, Pp. 445-447.
4. Sklar J. R., Ward J. 11 Copy: Steering Vector Methods. *Modern HF Signal Detection and Direction Finding*. MIT Press, 2018. Pp.269-288.
5. Ren K. Direction Finding Using a Single Antenna With Blade Modulation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2022. Vol. 21, no. 5, Pp. 873-877.
6. Sklar J. R., Ward J. 9 Direction Finding Techniques for HF Applications. *Modern HF Signal Detection and Direction Finding*, MIT Press, 2018. Pp.217-248.
7. Tetley L., Calcutt D. Chapter 10 - Radio direction finding *Electronic Navigation Systems (Third Edition)*. Elsevier Press, 2001, Pp. 346-368.
8. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., Tkachuk, V., Yehoshyna, H., Karpova, L. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. *Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer, 2023. Vol. 166. Pp. 89–107.
9. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., Tkachuk, V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023, 13(1), Pp. 26-32.
10. Sonnenberg G.J. Chapter 3 Direction finding *Book: Radar and Electronic Navigation (Sixth Edition)*. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. Published by Elsevier Ltd, 1988. Pp. 93-126.
11. Zhou W., Zhou Y. Research on Interferometer Direction Finding Technology Based on Digital Beam forming. 2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP): Proceedings 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP) (Suzhou, 20-22 July 2022). China, 2022, Pp. 54-58.

References

1. Lee J. -H., Kim J. -K., Ryu H. -K., Park Y. -J. Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018, Vol. 17, no. 4, Pp. 563-566.
2. Li J., Zhang Q., Deng W., Tang Y., Zhang X., Wu Q. Source Direction Finding and Direct Localization Exploiting UAV Array With Unknown Gain-Phase Errors. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022, Vol. 9, no. 21, Pp. 21561-21569.
3. He W., Zhou Q., Zhang X., Zhao Y., Li B., Zhang L. Research on direction finding of UAV coherent signals based on uniform circular array. 2022 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS): Proceedings 18th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS) (Chengdu 16-18 December 2022). China, 2022, Pp. 445-447.
4. Sklar J. R., Ward J. 11 Copy: Steering Vector Methods. *Modern HF Signal Detection and Direction Finding*. MIT Press, 2018. Pp.269-288.

5. Ren K. Direction Finding Using a Single Antenna With Blade Modulation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2022. Vol. 21, no. 5, Pp. 873-877.
6. Sklar J. R., Ward J. 9 Direction Finding Techniques for HF Applications. *Modern HF Signal Detection and Direction Finding*, MIT Press, 2018. Pp.217-248.
7. Tetley L., Calcutt D. Chapter 10 - Radio direction finding *Electronic Navigation Systems (Third Edition)*. Elsevier Press, 2001, Pp. 346-368.
8. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., Tkachuk, V., Yehoshyna, H., Karpova, L. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. *Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer, 2023. Vol. 166. Pp. 89–107.
9. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., Tkachuk, V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023, 13(1), Pp. 26-32.
10. Sonnenberg G.J. Chapter 3 Direction finding *Book: Radar and Electronic Navigation (Sixth Edition)*. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. Published by Elsevier Ltd, 1988. Pp. 93-126.
11. Zhou W., Zhou Y. Research on Interferometer Direction Finding Technology Based on Digital Beam forming. 2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP): Proceedings 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP) (Suzhou, 20-22 July 2022). China, 2022, Pp. 54-58.