

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-8>

УДК 621.396.969.1

АВДЄЄВ Віктор

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0001-8136-4989>

e-mail: avdieiev.v.m@gmail.com

ЯНОВИЦЬКИЙ Олександр

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0003-0107-7811>

e-mail: a_k_yan@ukr.net

ТКАЧУК Віталій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>

e-mail: tkachuk.v.p@gmail.com

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ АМПЛІТУДНОГО МЕТОДУ ПЕЛЕНГАЦІЇ З БПЛА

Досліджено можливості підвищення пеленгаційної чутливості амплітудного методу пеленгації. Розглянуто спосіб підвищення пеленгаційної чутливості амплітудного методу пеленгації на прикладі розробленого пеленгаційного пристрою, який можна встановлювати на будь-якому типі безпілотного літального апарату (БПЛА). Представлено структурну схему пеленгаторного пристрою, розглянуто його роботу та проведено дослідження його робочих характеристик. Запропонований спосіб підвищення пеленгаційної чутливості амплітудного методу пеленгації може бути використаний для практичних цілей в різних радіотехнічних виробках.

Ключові слова: БПЛА, пеленгація, чутливість, антени, РЕБ, радіосигнал

AVDIEIEV Viktor, YANOVICKIY Oleksandr

State Enterprise "Novator"

TKACHUK Vitalii, BOIKO Julii

Khmelnitskyi National University

INCREASING THE SENSITIVITY OF THE AMPLITUDE DIRECTION FINDING METHOD FROM AN UAV

The aim of the work is to study the possibility of increasing the direction-finding sensitivity of the amplitude direction finding method. The method of increasing the direction-finding sensitivity of the amplitude direction finding method is considered using the example of the developed direction-finding device, which can be easily installed on any type of unmanned aerial vehicle (UAV). A block diagram of the direction-finding device is presented, its operation is considered, and a study of its performance characteristics is carried out. The proposed method for increasing the direction-finding sensitivity of the amplitude direction finding method can be used for practical purposes in various radio engineering products. The goal of this work is to approach a universal method that can be used as the basis for a device that produces results quickly and while maintaining the necessary measurement accuracy. The authors of the article propose a direction-finding device, the excellent feature of which is its design simplicity and small weight and dimensions, which allows it to be easily installed on a UAV. Currently, small UAVs are being adapted to carry electronic warfare equipment, which involves using them for electronic reconnaissance, radio countermeasures of enemy electronic means by placing jamming transmitters on board, directing artillery fire, using them as kamikaze drones, or as erroneous targets. When creating a UAV, it is easier to use low-visibility technologies, which allows you to approach the target at a short distance and stay in a given area for a long period of time. The proximity of electronic jamming objects, in turn, reduces the energy costs of jamming, and also ensures the interception of low-power signals during electronic reconnaissance. The proposed direction-finding device includes: a direction-finding antenna consisting of two lobes separated by an expanding slit, which are installed perpendicular to the reflecting surface; two-channel superheterodyne receiver; received signal processing device. The basis of the direction-finding device is an in-phase-antiphase distributor, which is connected to the outputs of the antenna lobes and makes it possible to simultaneously form two direction-finding antenna patterns.

Keywords: UAV, direction finding, sensitivity, antennas, electronic warfare, radio signal.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На даний час невеликі безпілотні літальні апарати (БПЛА) пристосовуються під носії засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), що передбачає використання їх для ведення радіоелектронної розвідки, радіопротидії радіоелектронним засобам противника за рахунок розміщення на борту передавачів перешкод, наведення вогню артилерії, використання їх як дронів - камікадзе, або як помилкових цілей. При створенні

БПЛА простіше використовувати технології забезпечення малої помітності, що дозволяє їм наблизитися до цілі на ближчу відстань і знаходитись у заданому районі тривалий час. Близькість до об'єктів радіоелектронного придушення, у свою чергу, знижує енергетичні витрати на постановку перешкод, а також забезпечує перехоплення малопотужних сигналів при проведенні радіотехнічної розвідки.

Однак бойові комплекси радіоелектронної протидії (РЕП) БПЛА є ефективним засобом придушення каналів управління та навігації. Недостатня «інтелектуальність» постановки перешкод у цих комплексах компенсується їх високими енергетичними можливостями та універсальністю застосування по відношенню до всіх типів БПЛА. Усі комплекси РЕБ забезпечують випромінювання потужного сигналу перешкоди супутникової системи навігації (GPS), по якому можна визначити пеленг на дане джерело випромінювання [1-3]. Але установка повноцінного пеленгаційного пристрою на борту невеликого БПЛА неможлива з низки причин: великі габарити пеленгаційної антенної системи, велика маса приймальної частини та пристроїв обробки сигналів, необхідність додаткового каналу передачі отриманої інформації та конструктивні складності встановлення пеленгаційного пристрою на борту БПЛА без погіршення його льотних характеристик.

Метою цієї роботи є наближення до універсального методу, який можна покласти в основу приладу, що видає результат оперативно і зберігає при цьому необхідну точність вимірювань. У статті пропонується пеленгаційний пристрій, відмінною особливістю якого є конструктивна простота і малі масо-габаритні розміри, що дозволяє його встановлення на БПЛА.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз методів пеленгації [4-8] показує, що будь-який спеціалізований та функціональний засіб радіомоніторингу відрізняється технологічною складністю та високою вартістю. Альтернативою таких повнофункціональних засобів є усталені методи та прототипи, які можна доповнити новим змістом. Для вирішення більшості завдань необхідні прості, але водночас ефективні засоби пеленгації джерел сигналів та перешкод [9, 10].

Амплітудні методи пеленгації засновані на використанні спрямованих властивостей антен, основною характеристикою яких є пеленгаційна чутливість. Пеленгаційна чутливість – це здатність радіопеленгатора змінювати напругу на виході приймача за зміни положення діаграми спрямованості (ДС) антени щодо направлення на об'єкт радіовипромінювання.

$$S(\theta') = \frac{1}{U_{max}} \left[\frac{dU_{вир}(\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\theta'} \quad (1)$$

де θ' - значення кутової координати у точці визначення пеленгаційної чутливості.

Чим більша зміна напруги при заданій зміні кута, тим вища пеленгаційна чутливість. Якщо ΔU – мінімальна зміна вихідної напруги приймача, яку може зафіксувати вимірювач то згідно з абсолютною похибкою вимірювання кутової координати $\Delta\alpha \approx \Delta U / S(\theta')$. Таким чином, чим більша крутість пеленгаційної характеристики, тим вище пеленгаційна чутливість і тим менша похибка вимірювання кута на джерело випромінювання.

В якості пеленгаційної антени запропоновано антену з щілиною, що розширюється (TSA-Tapered Slot Antenna) [9], якій властиві наступні переваги: широкий діапазон робочих частот, високий коефіцієнт підсилення, прості вимоги до виготовлення, простота встановлення на БПЛА.

Зовнішній вигляд пеленгаційного пристрою, що пропонується, представлений на рис. 1.

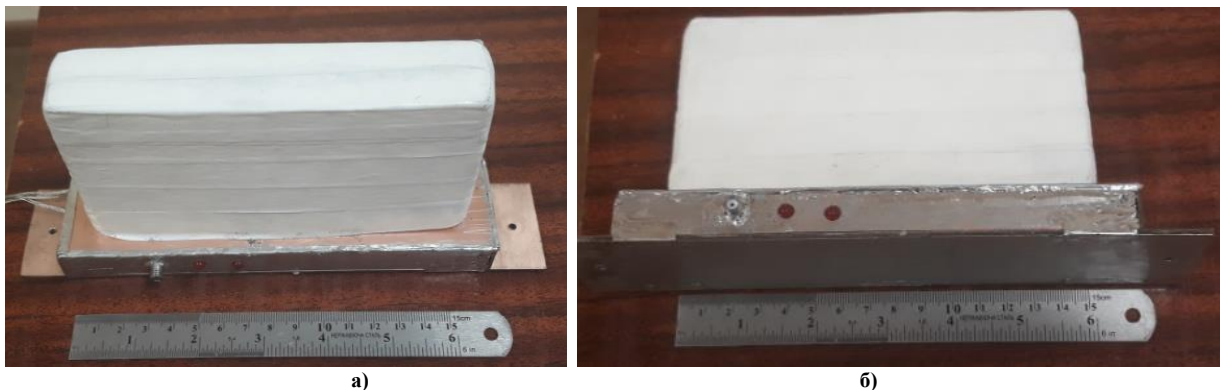


Рис.1. Зовнішній вигляд пеленгаційного пристрою: а) вид зверху, б) вид збоку

В основу роботи запропонованого пеленгаційного пристрою покладено синфазно-протифазний метод.

Розробка пеленгаційного пристрою на основі синфазно-протифазного методу пеленгації

Нехай два пелюстка пеленгаційної антени включені протифазно [9]. Тоді напруга на вході приймача дорівнюватиме геометричній сумі напруг кожного з пелюстків, тобто:

$$U_{\Pi} = U_1 + U_2 \quad (2)$$

де U_1 і U_2 - напруги на вході приймача від першої і другої пелюстки приймальної антени.

При цьому рівень сигналу на виході приймача досягає максимального значення при збігу осі антени з напрямленням на джерело сигналу.

При синфазному їх включенні напруга на вході приймача дорівнює геометричній різниці напруг кожного з пелюстків:

$$U_c = U_1 - U_2 \quad (3)$$

де U_1 і U_2 - напруги на вході приймача від першої і другої пелюстки приймальної антени.

Тоді при збігу осі антени з напрямком на джерело радіосигналу рівень сигналу на виході приймача дорівнює нулю.

На рис. 2 та рис. 3 приведені розрахункові ДС для синфазного та протифазного збудження пелюстків пеленгаційної антени.

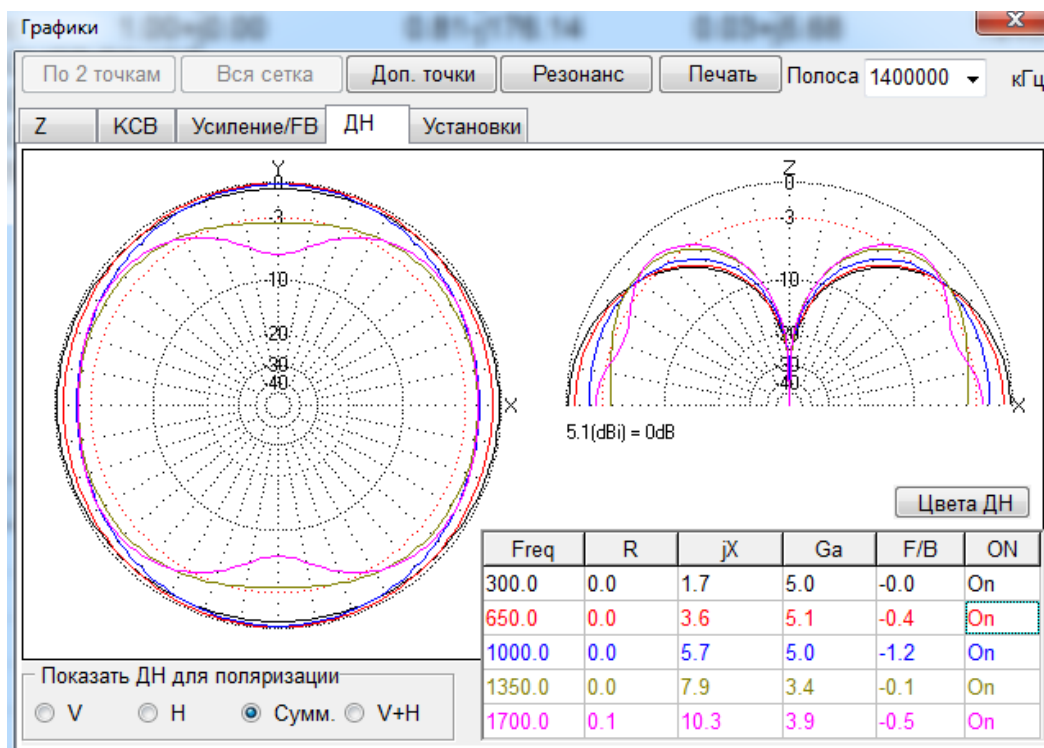


Рис.2. Розрахункова ДС пеленгаційної антени при синфазному включенні

Як видно з приведених діаграм спрямованості, ці антени зберігають форму ДС у широкому частотному діапазоні, що дозволяє на їх основі будувати широкосмугові пеленгаційні пристрої. Пеленгаційний пристрій, структурна схема якого наведена на рис. 4, вбирає в себе переваги методу максимуму - високу чутливість, та методу мінімуму - високу пеленгаційну чутливість.

До складу пеленгаційного пристрою входять: пеленгаційна антена, яка складається з двох пелюстків, розділених щілиною, що розширюється, які встановлені перпендикулярно поверхні, що відбиває [9]; двоканальний приймач супергетеродинного типу; прилад обробки прийнятих сигналів.

Основою пеленгаційного пристрою є синфазно-протифазний розподільник, що підключається до виходів антенних пелюстків та дає можливість одночасного формування двох ДС пеленгаційної антени, 3D вид яких представлений рис. 5 та рис. 6.

При спрямуванні осі антени на джерело сигналу на одному виході розподільвача присутній максимальний рівень сигналу, а на другому - мінімальний.

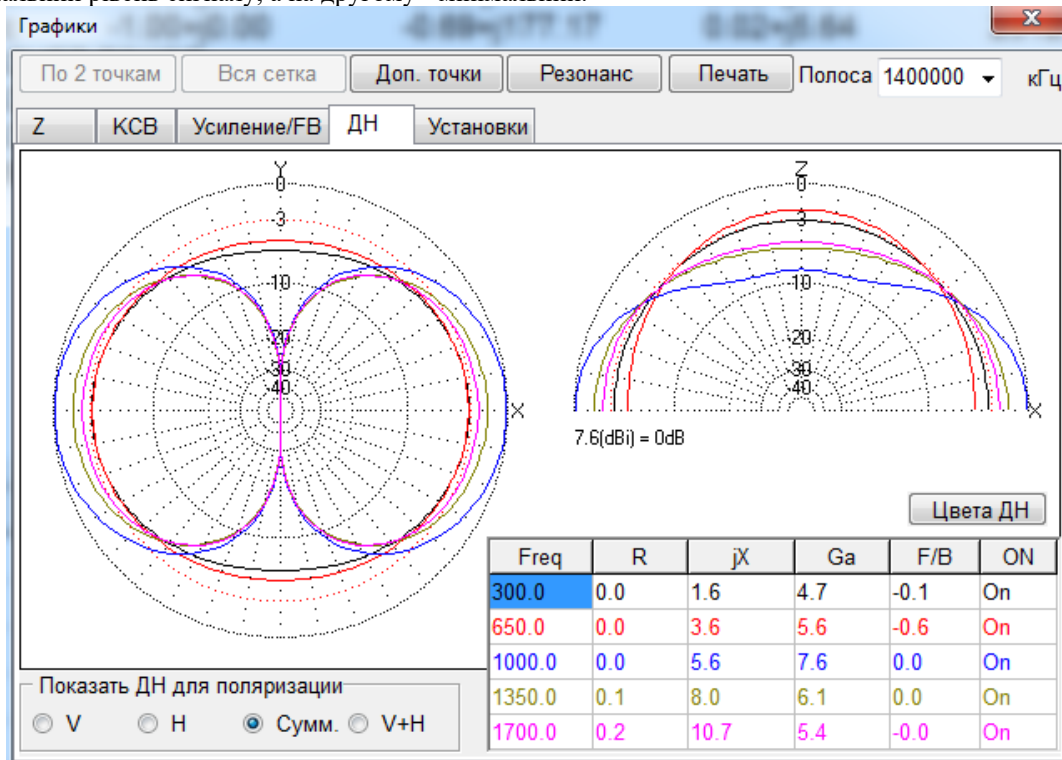


Рис. 3. Розрахунки ДС пеленгаційної антени при протифазному включенні

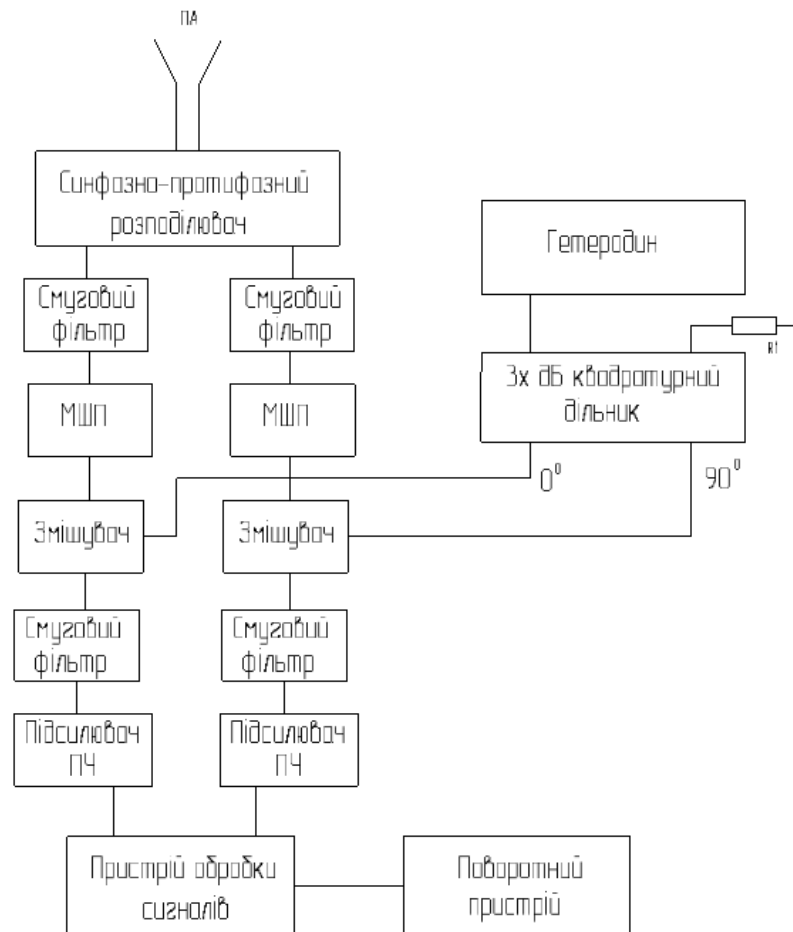


Рис.4. Структурна схема пеленгаційного пристрою

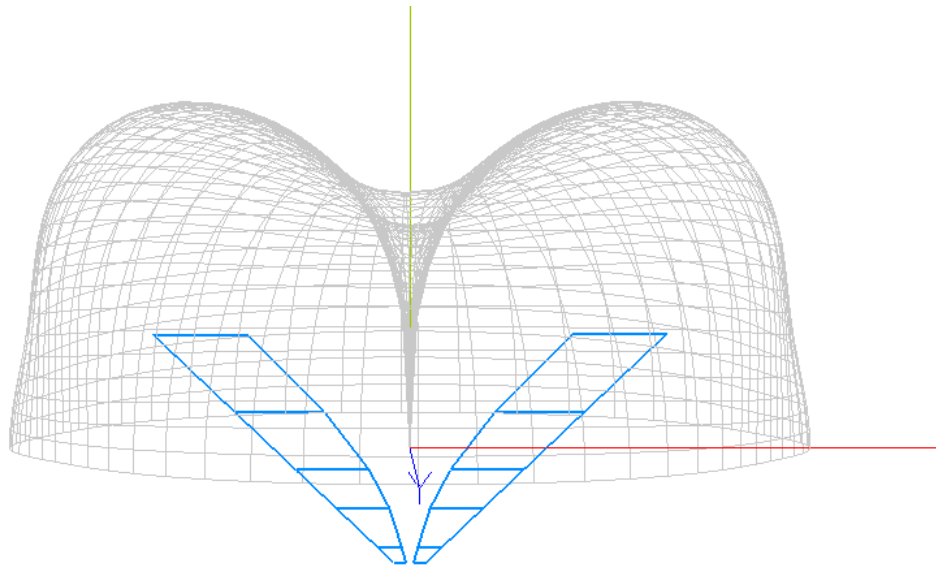


Рис.5. ДС при синфазному збудженні пелюстків антени на частоті 1575 МГц

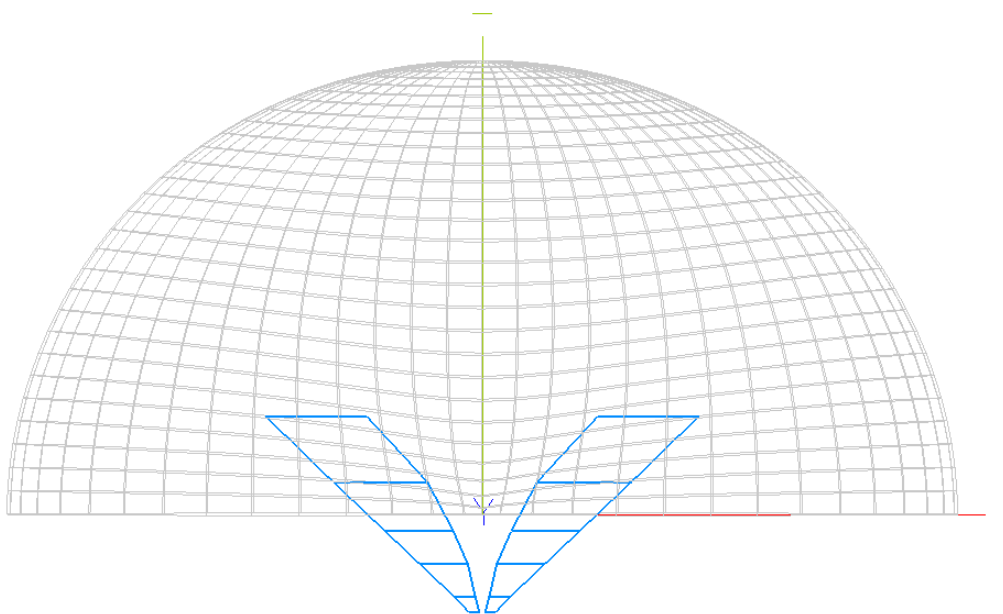


Рис.6. ДС при протифазному збудженні пелюстків антени (1575 МГц)

Крім того, 90 градусний зсув сигналу гетеродину необхідний для реєстрації необхідного напрямку повороту БПЛА на джерело сигналу. Критерієм визначення напрямку на джерело радіовипромінювання є мінімальний рівень сигналу на синфазному виході при наявності максимального рівня сигналу на протифазному виході. Якщо вихідні сигнали двоканального приймача подати на комутатор, який з частотою F_k підключає їх до третього виходу, то на цьому виході отримуємо меандр з амплітудою рівною різниці амплітуд двох вхідних сигналів. Амплітуда сигналу меандру буде максимальна при збігу напрямку осі пеленгаційної антени з напрямком на джерело радіосигналу, а при незначному відхиленні від цього напрямку зменшення амплітуди меандру буде пропорційне пеленгаційній чутливості пеленгаційної антени для конкретного кута при синфазному збудженні. Таким чином, підвищення точності визначення напрямку на джерело сигналу досягається за рахунок використання високої крутизни пеленгаційної характеристики антени при синфазному збудженні, що забезпечує при відхиленні пеленгаційної антени на 1-3 градуса від напрямку на джерело сигналу, збільшення рівню сигналу на синфазному виході приймача на 3-5 дБ. При відхиленні від напрямку, який збігається з напрямком на джерело сигналу, що пеленгується, сигнал на одному виході зменшується, а на другому виході збільшується і лише при нульовому рівні сигналу на синфазному виході напрямком на пеленгований сигнал збігається з напрямком осі пеленгаційної антени.

Пристрій обробки сигналів забезпечує формування трьох вихідних сигналів: з амплітудою пропорційною максимальному рівню сигналу, прийнятого протифазною ДС; з амплітудою пропорційною мінімальному рівню сигналу, прийнятого синфазною ДС та меандру із частотою близькою до 50 кГц, отриманою шляхом комутації перших двох сигналів. Ці сигнали після подальшої обробки керують напрямком орієнтації осі БПЛА. Інформація про орієнтацію БПЛА постійно передається оператору, який керує польотом і він має можливість на протязі невеликого проміжку часу визначити напрямок на джерело радіосигналу. При використанні трьох БПЛА вертолїтного типу оператор може з високою точністю визначити координати джерел радіовипромінювання, що значно підвищує ефективність застосування засобів РЕБ [11-14].

Вимірювання пеленгаційної характеристики досліджуваного пристрою проводилося в екранованому приміщенні для виключення впливу сторонніх випромінювань. В якості джерела сигналу використовувався генератор шуму шириною робочої смуги 5 МГц з центральною частотою 1575 МГц, розміщений на відстані 5м від пеленгаційного пристрою. Пеленгаційний пристрій було встановлено на поворотній платформі, що дозволяло здійснювати його поворот з кроком в 1 градус. При цьому при кожному кроці поворотного пристрою фіксувався рівень синфазного та протифазного сигналів на виходах приймальних каналів. За допомогою лазера, встановленого на поворотній платформі, визначався напрямок осі пеленгаційної антени по відношенню до передавальної антени [15]. Зовнішній вид поворотної платформи приведений на рис. 7.

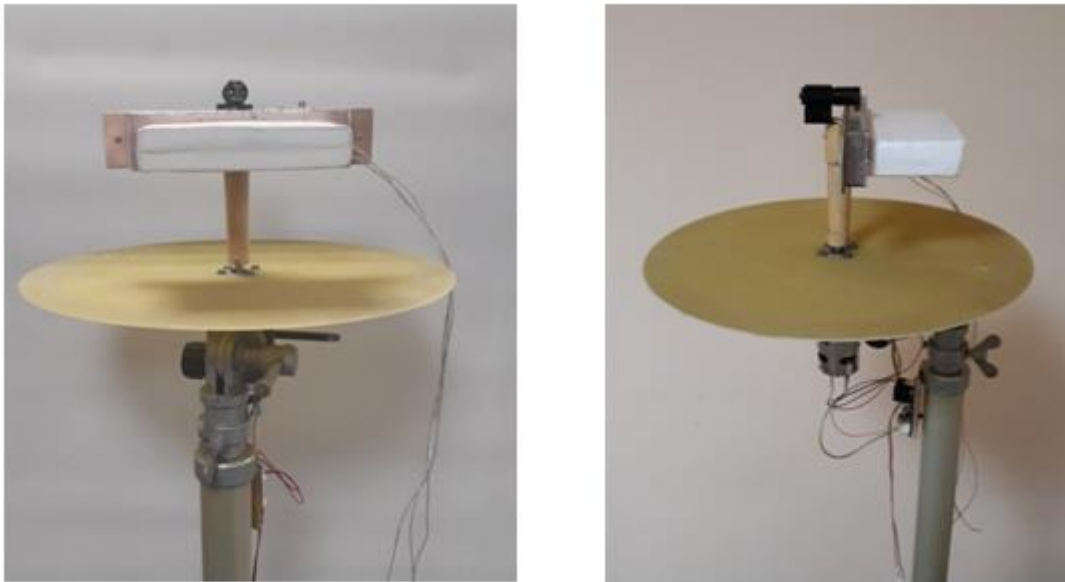


Рис.7. Зовнішній вид поворотної платформи

Результати вимірювань пеленгаційної чутливості наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань пеленгаційної чутливості

№	Кут повороту, град.	Напряга на синфазному виході, В	Напряга на протифазному виході, В
1	-12	1,88	5,40
2	-10	1,62	5,60
3	-8	1,32	5,7
4	-6	0,97	5,8
5	-4	0,57	5,8
6	-2	0,17	5,8
7	0	0,02	5,8
8	2	0,22	5,8
9	4	0,63	5,8
10	6	1,19	5,8
11	8	1,47	5,63
12	10	2,05	5,47

Як можна побачити з цих результатів, пеленгаційна чутливість зростає у міру наближення до нуля кута відхилення від напрямку на джерело радіосигналу, що значно підвищує точність визначення напрямку на джерело радіосигналу, яка вже визначається інструментальною похибкою.

Результати вимірювання підтвердили, що використання даного способу підвищення пеленгаційної чутливості дозволяє з точністю 1-2 градуса визначати напрямок на джерело радіосигналу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Виходячи з вищевикладеного можна зробити такі висновки:

- розроблений спосіб підвищення пеленгаційної чутливості дозволяє при отриманні найбільшого співвідношення сигнал/шум на виході приймального пристрою (сигнал меандру, у якого нижня амплітуда дорівнює напрузі на синфазному виході, а верхня амплітуда - напрузі на протифазному виході) визначати напрямок на джерело радіосигналу з точністю не менш 2 град.;
- розроблений пристрій можна легко встановити на любий тип БПЛА;
- використання даного типу пеленгаційної антени [15] дозволяє здійснювати визначення напрямку на джерело радіосигналу у широкому робочому діапазоні частот.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі будуть спрямовані на експериментальне дослідження запропонованого пеленгаційного пристрою у складі різних конструкцій БПЛА.

Література

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, Pomiar 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.
12. Xiang B. et al. UAV Detection Research Based on A Low-cost SDR. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT): Proceedings 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) (Shanghai, 20-23 September 2020)*. China, 2020, Pp. 1-3.
13. Parkhomey, I., Boiko, J., Tsopa, N., Zeniv, I., Eromenko, O. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2020, 18(4), Pp. 2070-2079.
14. Memarian Z., Majidi M. Multiple Signals Direction Finding of IoT Devices Through Improved Correlative Interferometer Using Directional Elements. *2022 Sixth International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT): Proceedings 2022 Sixth International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT) (Mashhad, 14-15 September 2022)*. Iran, 2022, Pp. 1-6.
15. Бойко Ю. М., Полікарівських О. І., Ткачук В. П., Авдєєв В. М., Свістунов О. С. Моделирование характеристик широкополосной антенной системы для пеленгации БПЛА. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022, № 3, С. 158-167.

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, Pomiar 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.
12. Xiang B.*et al.* UAV Detection Research Based on A Low-cost SDR. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*: Proceedings 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) (Shanghai, 20-23 September 2020). China, 2020, Pp. 1-3.
13. Parkhomey, I., Boiko, J., Tsopa, N., Zeniv, I., Eromenko, O. Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference. *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2020, 18(4), Pp. 2070-2079.
14. Memarian Z., Majidi M. Multiple Signals Direction Finding of IoT Devices Through Improved Correlative Interferometer Using Directional Elements. *2022 Sixth International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT)*: Proceedings 2022 Sixth International Conference on Smart Cities, Internet of Things and Applications (SCIoT) (Mashhad, 14-15 September 2022). Iran, 2022, Pp. 1-6.
15. Boiko J., Polikarovskiykh O., Tkachuk V., Avdieiev V., Svistunov O. MODELING THE CHARACTERISTICS OF A BROADBAND ANTENNA SYSTEM FOR UAV DIRECTION FINDING. *Herald of Khmelnytskyi national university*. 2022, № 3, Pp. 158-167.