

БОЙКО Ю. М.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>e-mail: boikojulius@ukr.net

ПОЛІКАРОВСЬКИХ О. І.

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>e-mail: polalexey@gmail.com

ТКАЧУК В. П.

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: tkachuk.v.p@gmail.com

АВДЄЄВ В. М.

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0001-8136-4989>e-mail: avdieiev.v.m@gmail.com

СВИСТУНОВ О. С.

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0002-8474-1978>e-mail: office@novator-tm.com

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОСМУГОВОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА

В статті проведено аналіз сучасного стану питання проектування широкосмугових антенних систем для розробки пеленгаційних комплексів БПЛА. Здійснено опис прототипу антенної системи на основі елементу антени Вівальді. Встановлено експериментальну залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени. Проведено моделювання запропонованої конструкції широкосмугової антенної системи засобами математичного моделювання. Розглянуто методики налаштування запропонованої антенної системи в діапазоні частот за різних умов збудження. Визначено основні тренди у зміні основних параметрів запропонованої антенної системи у широкому діапазоні частот можливої експлуатації.

Ключові слова: БПЛА, антена, пеленгація, діаграма спрямованості, широкосмуговий випромінювач.

Juliya BOIKO, Vitaliy TKACHUK

Khmelnytskyi National University

Oleksiy POLIKAROVSKYKH

Odessa National Maritime University

Victor AVDIEIEV, Oleksiy SVISTUNOV

State Enterprise "Novator"

MODELING THE CHARACTERISTICS OF A BROADBAND ANTENNA SYSTEM FOR UAV DIRECTION FINDING

The paper presents the results of the development and modelling of a broadband antenna system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) direction finding. The research covered the issues of analytical description of the antenna system based on the prototype - the Vivaldi antennas. The article presents a mathematical description of the Vivaldi antenna element model. An experimental relationship between the geometrical parameters and characteristics of the antenna has been established. A review of the current state of the issue of designing antenna systems based on the concept of building ultra-wideband directional antenna elements in the absence of a phase centre has been carried out. The main trends in the modern design of broadband antenna systems are determined. The main parameters of the proposed broadband antenna are determined by the method of mathematical modelling. The parameters of the proposed antenna in the frequency range under various excitation conditions are studied, and the specifics of the application of such a system under the conditions of its possible use as part of UAV direction-finding complexes are given. The most optimal design option for an ultra-wideband antenna element is a design with an expanding slot (similar to Vivaldi antennas). At present, these antennas are widely used in various devices, namely, in radio reconnaissance devices, medical equipment, etc. Their popularity is due to the presence of advantages over other antennas, among which are a wide operating frequency range, simple design, simple manufacturing requirements, and high gain. In this paper, we considered Tapered Slot Antenna - an antenna with a widening slot. The antenna element designed and modelled in the article is a modified Vivaldi antenna (an antenna with a quasi-slot line with expansion), which is being developed for the direction-finding complex of the UAV. When calculating the TSA of the antenna element, the program for calculating the characteristics of the antennas MMANA was used in order to accelerate the study of the main laws for obtaining the required characteristics. Particular attention was paid to the possibility of changing the radiation pattern (RP) depending on the phase relations of the voltage at the input of the antenna elements.

Keywords: UAV, antenna, direction finding, radiation pattern, broadband antenna emitter.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розробка конструкцій надширокосмугових (НШП) антен є актуальним завданням. Інтерес до таких антен пояснюється тим, що вони потрібні в багатьох галузях радіотехніки [1, 2]. Застосування широкосмугових або надширокосмугових антен в інформаційних системах дозволяє збільшити ширину каналу прийому. НШП-антени відмінно інтегруються в системи приладів виявлення, точного

позиціонування та радіолокації [3]. На основі таких антен стає можливою реалізація вбудованих функціональних пересувних систем. Тому дослідженням та розробкам НШП-антен приділялося багато уваги протягом десятиліть та було розроблено багато типів НШП-антен [4].

Оптимальним варіантом конструкції надширокопasmового антенного елемента є конструкція з щілиною, що розширюється (подібно до антен Вівальді) [1]. В даний час ці антени широко використовуються в різних пристроях, а саме пристроях радіорозвідки, медичної техніки і т. п. Їх популярність викликана наявністю переваг відносно інших антен, серед яких можна виділити: широкий діапазон робочих частот, нескладна конструкція, прості вимоги до виготовлення, високий коефіцієнт підсилення [5].

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є розробка моделі широкопasmового випромінювача, визначення характеристик спрямованості, частотних характеристик даного випромінювача, розгляд можливості застосування даного випромінювача в якості антенного елемента при побудові пеленгаційних антенних решіток (АР) для радіолокації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [6-9].

У даній роботі буде розглядатися TSA (аббревіатура від англ. Tapered Slot Antenna) - антена з щілиною, що розширюється. Антенний елемент який розроблено та промодельовано у статті, є модифікованою антеною Вівальді (антена із квазіщілинною лінією з розширенням) яка розробляється для пеленгаційного комплексу БПЛА.

Аналіз досліджень та публікацій

Розглянемо аналітичний опис методів дослідження конструкції антени Вівальді рис. 1 [1, 2].

У відповідності до рис. 1, антена Вівальді представляє собою надширокопasmовий друкований випромінювач який побудований на основі щілинної лінії яка розширюється. В цьому випадку узгоджений перехід між лінією щілини яка не випромінює і вільним простором може бути здійснений за допомогою експоненційної щілинної лінії у формі щілини Вівальді [1]. Така конструкція в результаті перетворює біжучі поверхневі хвилі у випромінювальні хвилі витоку. Залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени була встановлена експериментально [2]. Експоненційна конусність тонкої металеві антени Вівальді яка розташована в площині XY (рис. 1 б) може бути описана точками $P1$ та $P2$ в точках з координатами $(X1, Y1)$ і $(X2, Y2)$ відповідно, а також коефіцієнтом розкриття R .

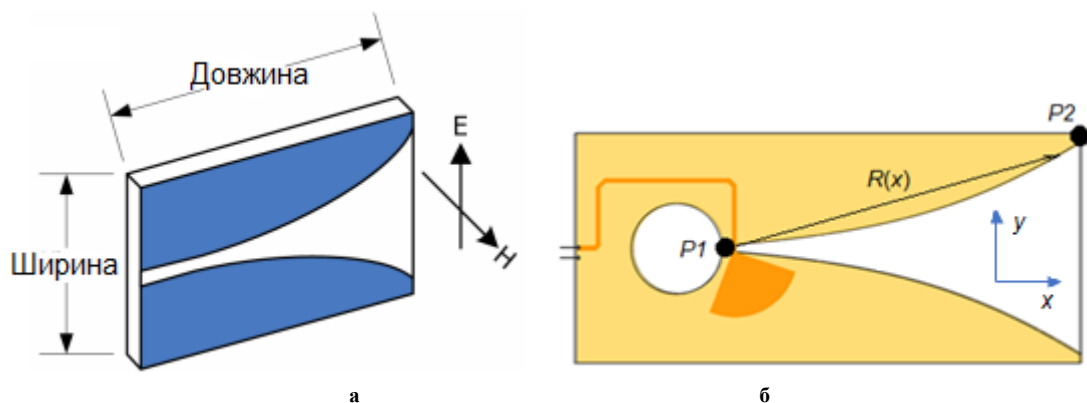


Рис. 1. Конструкція елемента антени Вівальді: а – 3D – репродукція; б – схема з параметрами для аналітичного опису

Між точками $P1$ та $P2$ експоненційний конус описується наступними диференціальними рівняннями:

$$\frac{dy}{dx} = Ry + C, \quad (1)$$

де R – представляє собою коефіцієнт кривизни розкриття антени, а C – буде відображати зміщення від y яке обране так, що $P1$ та $P2$ є точками на лінії $y(x)$, рис. 1 б.

Тоді загальний розв'язок рівняння (1) буде мати вид:

$$y = C_1 e^{Rx} + C_2 \quad (2)$$

або

$$C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (3)$$

і

$$C_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}. \quad (4)$$

Таким чином, математична модель верхньої вигнутої кромки елемента антени може бути представлено як:

$$R(x) = x e_{\square_x} + |C_1 e^{Rx} + C_2| e_{\square_y}, \quad x_1 \leq x \leq x_2. \quad (5)$$

Довжина ділянки кривизни елементу антени буде описуватись математично наступним чином:

$$l(x) = \int_{\xi=x_1}^x \left| R(\xi) \right| d\xi = \frac{1}{R} \left[\sqrt{1 + (C_1 R)^2 e^{2R\xi}} - \operatorname{arctanh} \left(\sqrt{1 + (C_1 R)^2 e^{2R\xi}} \right) \right]. \quad (6)$$

Таким чином для представлення кривих які описують пелюстки антени Вівальді можна використати пару рівнянь [1]:

$$x = x_1 + K(x_2 - x_1), \quad (7)$$

$$y = \frac{(y_2 - y_1) e^{R(x_1 + K(x_2 - x_1))} + y_2 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}. \quad (8)$$

У формулах 6-8 використано такі позначення: $R(\xi)$ – похідна від $R(x)$ де R – радіус кривизни пелюстки антени; y_1 – координата перекриття пелюстки антени відносно осі абсцис (рис. 1б); y_2 – відстань від середини верхньої частини антени до пелюстки – розкриття антени; x – змінна яка належить інтервалу $0 \dots x_2$ і яка визначає функцію y , що визначає зміну кривої пелюстки від перекриття до розкриття антени; x_1 – змінна яка визначає нижню точку початку пелюстки антени; x_2 – висота пелюстки та висота всієї антени (рис. 1 а); K – значення коефіцієнту.

На теперішній момент часу розвитку антенних систем для проектування пеленгаційних комплексів БПЛА можна виділити конструкції антен фірми TCI [10], зокрема моделі 641, 643. Загалом конструкції таких антен ґрунтуються на описаних вище загальних положеннях відносно параметрів антени Вівальді. Однак, ключова особливість таких антен полягає у застосуванні надширококутових спрямованих елементів антени які не мають фазового центру. Антена містить системи типу TEM-рупор, (побудована на двох ідентичних дзеркально вигнутих одна відносно одної провідних пластини) із смужками які розширюються, причому кожна із смужок розділена на дві частини щілиною (аналогічно розглянутій вище антени Вівальді, рис. 1 а). На рис. 2 а та б, відповідно, представлено конструкції антен TCI:

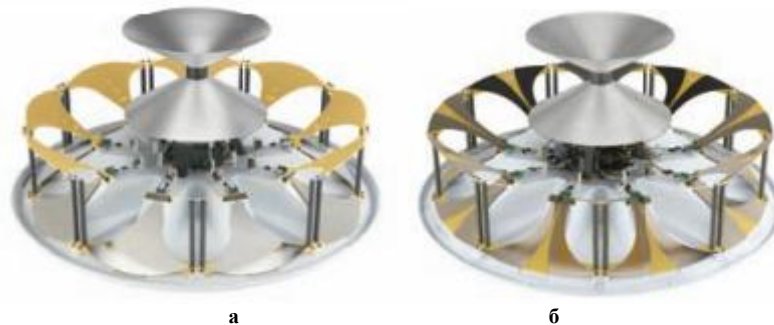


Рис. 2. Конструкція антен TCI: а – TCI 641; б - TCI 643

Аналіз конструктивних особливостей антенних систем без фазового центру, дозволяє констатувати, що основа конструкції таких надширококутових антен містить сукупність TEM-рупорів і антен Вівальді. Серед схожих рішень, в предметній області статті, можна виділити антенні системи фірм Rohde&Schwarz на основі фазованих антенних решіток, симетричних антенних вібраторів та антен рамкового типу [5].

Як було зазначено у постановці завдання на дослідження у запропонованій статті розглядаються результати моделювання відносно нової конструкції антени яка розробляється для пеленгації БПЛА та містить концепцію TSA. Теорія цих антен описана вище. Потрібно зазначити, що уточнення конкретного завдання на проектування антенної системи дає різноманітність форм та пропорцій між її конструктивними елементами. При аналізі існуючої інформації з даного питання було з'ясовано такі закономірності для TSA:

- ширина щілини визначає нижню частоту робочого діапазону;
- довжина визначає підсилення в середині та на верхньому краю смуги частот;
- форма розімкнутої щілини визначає частотні характеристики антенного елемента. Вважається, що найбільш прийнятними частотними характеристиками володіють TSA з експоненційно наростаючою шириною щілини (рівняння 5).

У статті буде представлено результати моделювання характеристик антенної системи за допомогою засобів програмного моделювання. Проведемо короткий огляд програмного забезпечення для моделювання антен.

Існує великий вибір у програмного забезпеченні для моделювання електромагнітних полів, антен і пристроїв надвисоких частот (НВЧ) [11, 12]. Нижче наведено основні виробники САПР НВЧ та деякі інші програмні продукти.

FEKO – це широкофункціональне програмне середовище для чисельного електромагнітного

моделювання, засноване на сучасних обчислювальних технологіях (СЕМ) і дозволяє вирішувати широке коло завдань.

HFSS – це стандартизований у промисловості інструмент для моделювання тривимірних електромагнітних полів. Технологія HFSS дозволяє виконувати розрахунок електричних та магнітних полів, струмів, S -параметрів, випромінювань полів у ближній та дальній зоні. Процес виконання розрахунку повністю автоматизований, користувачеві необхідно лише визначити геометричні параметри, властивості матеріалів і бажаний результат.

CST MICROWAVE STUDIO використовує всі традиційні методи моделювання, а також сучасний часовий метод. Пакет створено німецькою компанією Computer Simulation Technology (CST).

Програмний пакет CST MICROWAVE STUDIO – це узагальнений результат багаторічних досліджень та розробок у галузі ефективного чисельного моделювання тривимірних електродинамічних структур. Це інструмент для швидкого і точного моделювання надвисокочастотних пристроїв, а також аналізу проблем цілісності сигналів і електромагнітної сумісності в часовій та частотній областях з використанням прямокутної або тетрадральної сіток розбиття. Необхідність вивчення програмного продукту CST MICROWAVE STUDIO обумовлено тим, що проектування досить складних, отже, і дорогої радіоелектронної апаратури без застосування САПР у мінімальні терміни і якісно просто неможливе [13]. Проектування займає тривалий час, а потім ведеться експериментальна доробка, яка затягується на тривалий період, збільшуючи вартість РЕА.

Моделювання характеристик антенної системи

На даний момент існує безліч статей, що описують процес моделювання, розрахунку та виробництва друкованих випромінювачів, зокрема антен Вівальді [1, 2].

При розрахунку TSA антенного елемента була використана програма розрахунку характеристик антен MMANA з метою прискорення вивчення основних закономірностей отримання необхідних характеристик.

Особливу увагу приділялося можливості зміни діаграми спрямованості (ДС) залежно від фазових співвідношень напруги на вході антенних елементів. Для пояснення, наведено зовнішній вигляд і частотні характеристики ДС при синфазних сигналах на входах вібраторів антен, рис. 3 і при протифазному збудженні антенних вібраторів - на рис. 4.

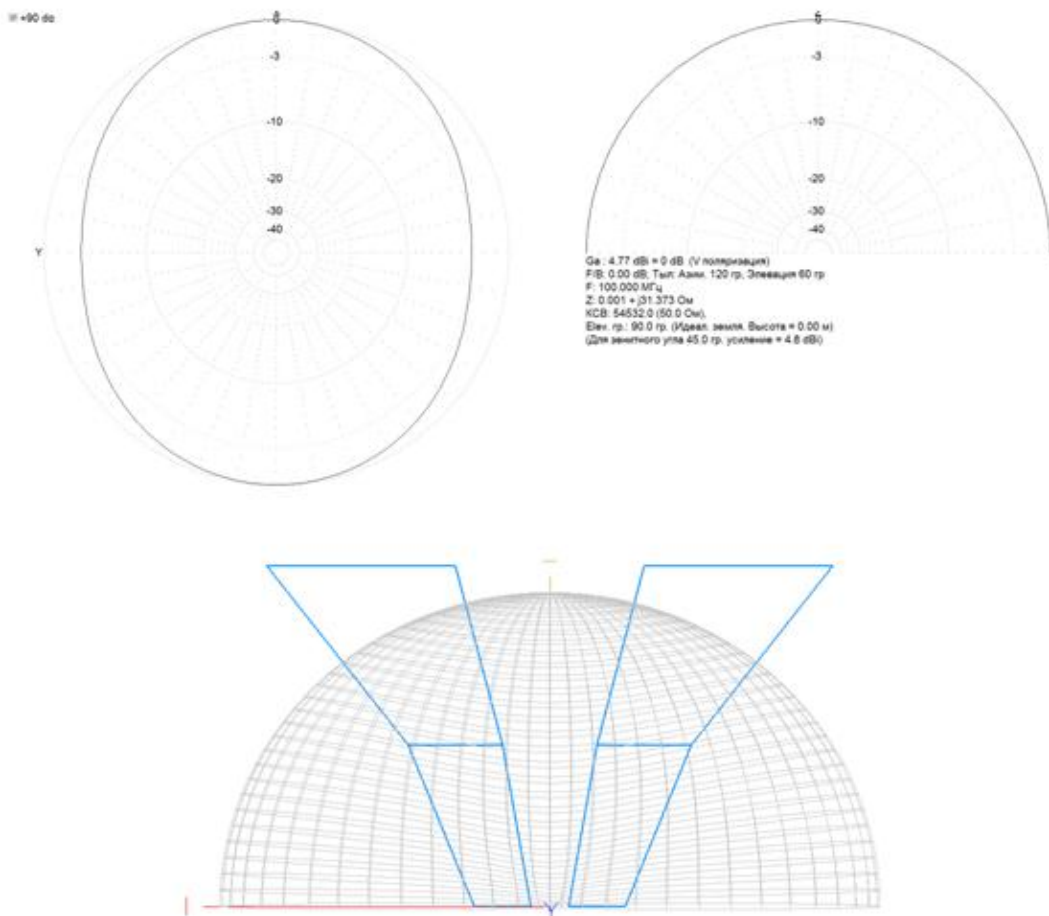


Рис. 3. Зовнішній вигляд антенного елемента та його характеристики при протифазному збудженні вібраторів

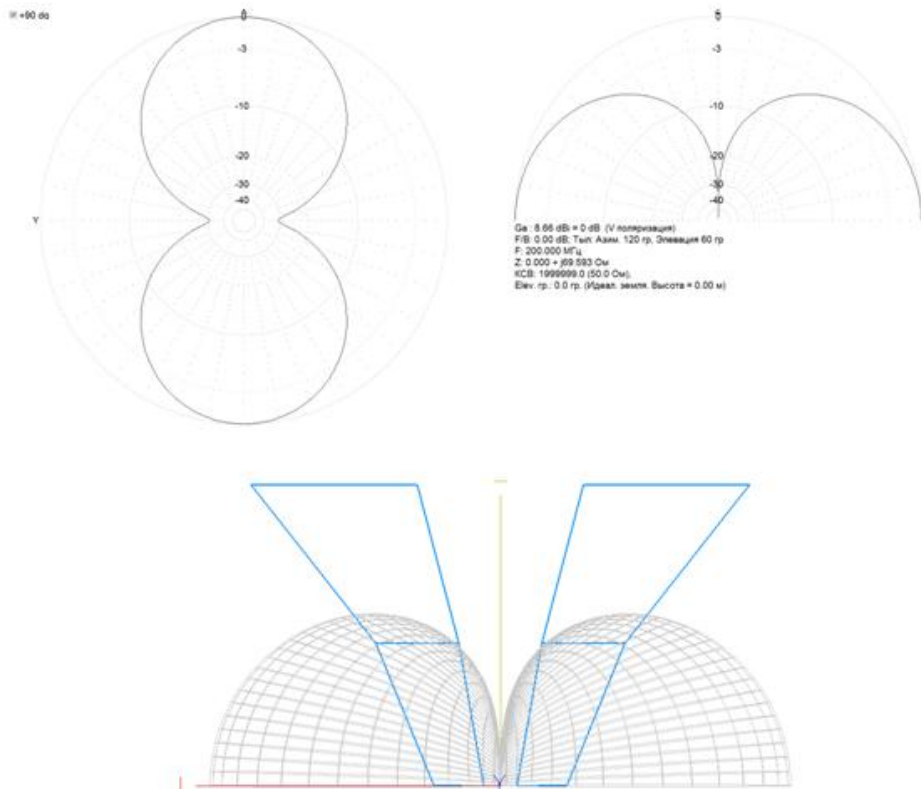


Рис. 4. Зовнішній вигляд антенного елемента та його характеристики при синфазному збудженні вібраторів

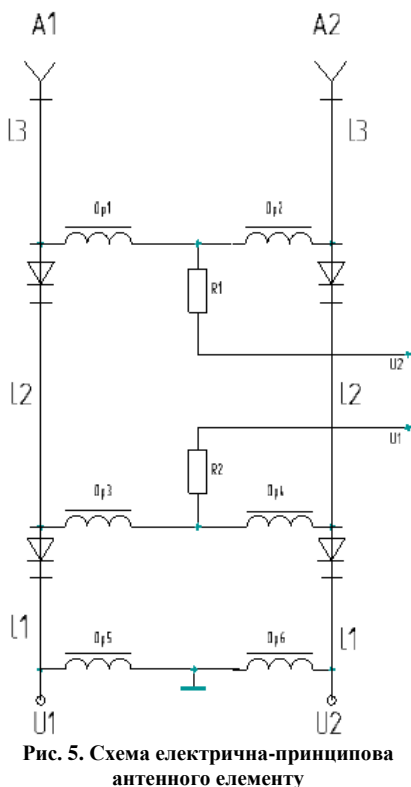


Рис. 5. Схема електрична-принципова антенного елемента

Як видно з рис. 3 та рис. 4, не змінюючи конструкцію антенного випромінювача можна отримати абсолютно різні ДС змінюючи фазові співвідношення на входах антенних вібраторів. Цю особливість буде використано при побудові амплітудного пеленгатора БПЛА з високою роздільною здатністю. Розглянемо особливості розробки широкопasmового випромінювача антенної системи.

У процесі проведення розрахунків було з'ясовано наступне:

- не можливо забезпечити перекриття необхідного діапазону частот 100-3000 МГц простим антенним елементом TSA;
- неможливо отримати прийнятний коефіцієнт стоячої хвилі (КСХН) антенного елемента у широкому частотному діапазоні;
- форма ДС антенного елемента зберігає прийнятні характеристики діапазону частот в межах октави.

Для усунення перерахованих недоліків пропонується конструкцію антенного елемента розбити на три складові, які необхідно буде з'єднати за схемою представленою на рис.5.

У випадку відсутності керуючого напруги U_1 і U_2 робочою ділянкою випромінюючого елемента є L1 обох випромінюючих вібраторів і випромінюючий елемент забезпечує необхідні характеристики у верхній частині робочого діапазону частот.

При подачі керуючою напруги U_1 - робочою ділянкою випромінюючого елемента є L1 разом з L2. В цьому випадку випромінюючий елемент має хороші характеристики в середній частині робочого діапазону (тоді як у верхній і нижній частині робочого діапазону вони значно гірші). І нарешті, при подачі керуючою напруги U_2 робочою ділянкою випромінюючого елемента є вся його поверхня, що забезпечує хороші робочі характеристики нижньої частини робочого діапазону частот.

Розрахунок випромінюючого елемента проводився в три етапи: спочатку розраховувалася оптимальна структура у високочастотній частині робочого діапазону, потім - в середньочастотній частині і нарешті в низькочастотній частині. На рис. 6 представлено характеристики антенного елемента у випадку синфазного збудження за відсутності керуючої напруги.

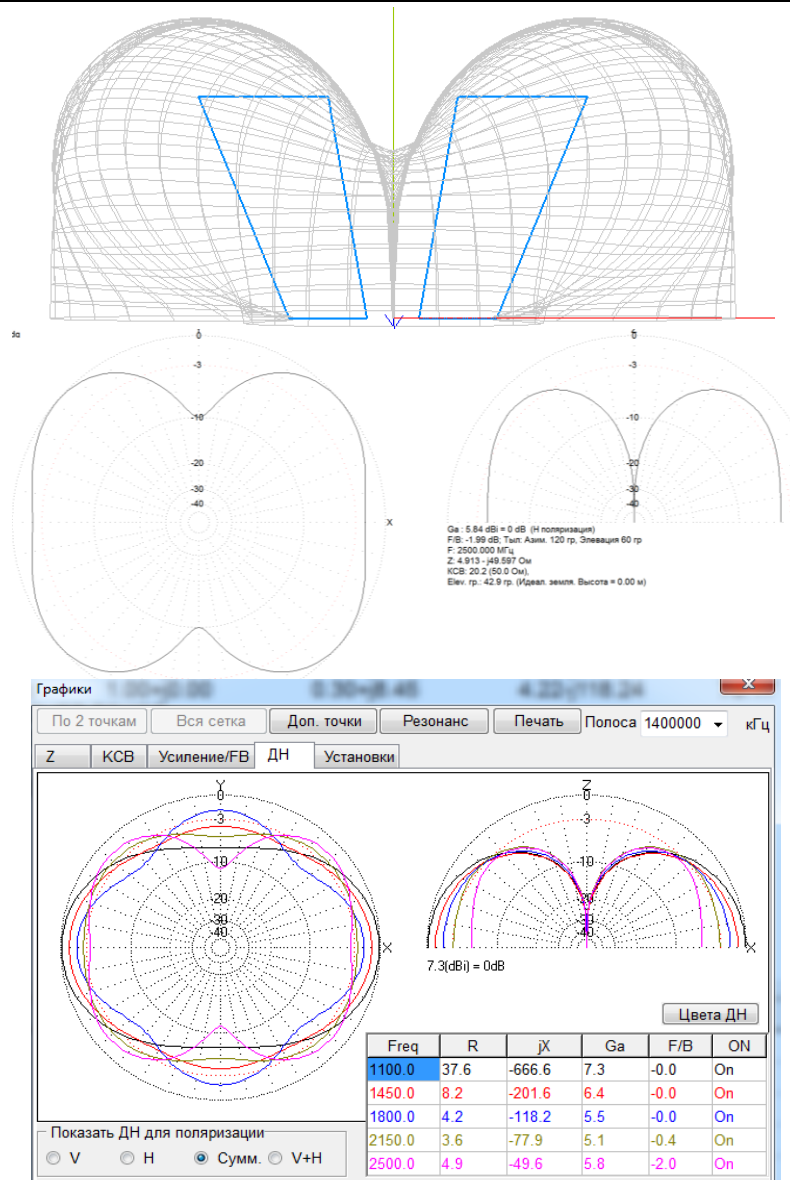


Рис. 6. Характеристики антенного элемента при синфазному збудженні за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)

На рис. 7 представлено характеристики антенного елемента у випадку протифазного збудження за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина).

Результати моделювання дозволяють дослідити процес зміни характеристики спрямованості випромінювача в робочому діапазоні частот. Зокрема на рис. 6 та рис. 7 представлено просторові ДС випромінювача та коефіцієнти підсилення (КП) в робочому діапазоні частот.

З рис. 6 та 7 встановлюємо, що в діапазоні частот 1100-2500 МГц (ВЧ частина робочого діапазону) антенний елемент має хороші характеристики по ДС, коефіцієнту підсилення і КСХН (див. рис. 8).

При подачі керуючої напруги U_1 до основного антенного елемента підключається другий відрізок до двох вібраторів, що практично переводить антени в середню ділянку частотного діапазону. При цьому у ВЧ частини діапазону його характеристики погіршуються, а в НЧ частини робочого діапазону спостерігається погане узгодження і невисокий коефіцієнт підсилення. Робочі характеристики антенного елемента представлені на рис. 9–12. Середня частина робочого діапазону займає смугу від 400 до 1200 МГц.

Подачею керуючої напруги U_2 переводиться в робочий стан вся конструкція антени, що забезпечує хороші робочі характеристики в нижній частині робочого діапазону. При цьому характеристики антенного елемента в ВЧ стають ще гіршими (спотворюється ДС та з'являються бічні пелюстки, наявність яких вкрай небажана при побудові пеленгаційних пристроїв), а у середній частині діапазону характеристики ДС погіршуються.

Таким чином розбивши робочий діапазон частот на три ділянки можна перекрити діапазон частот 100-2500 МГц з хорошими робочими характеристиками.

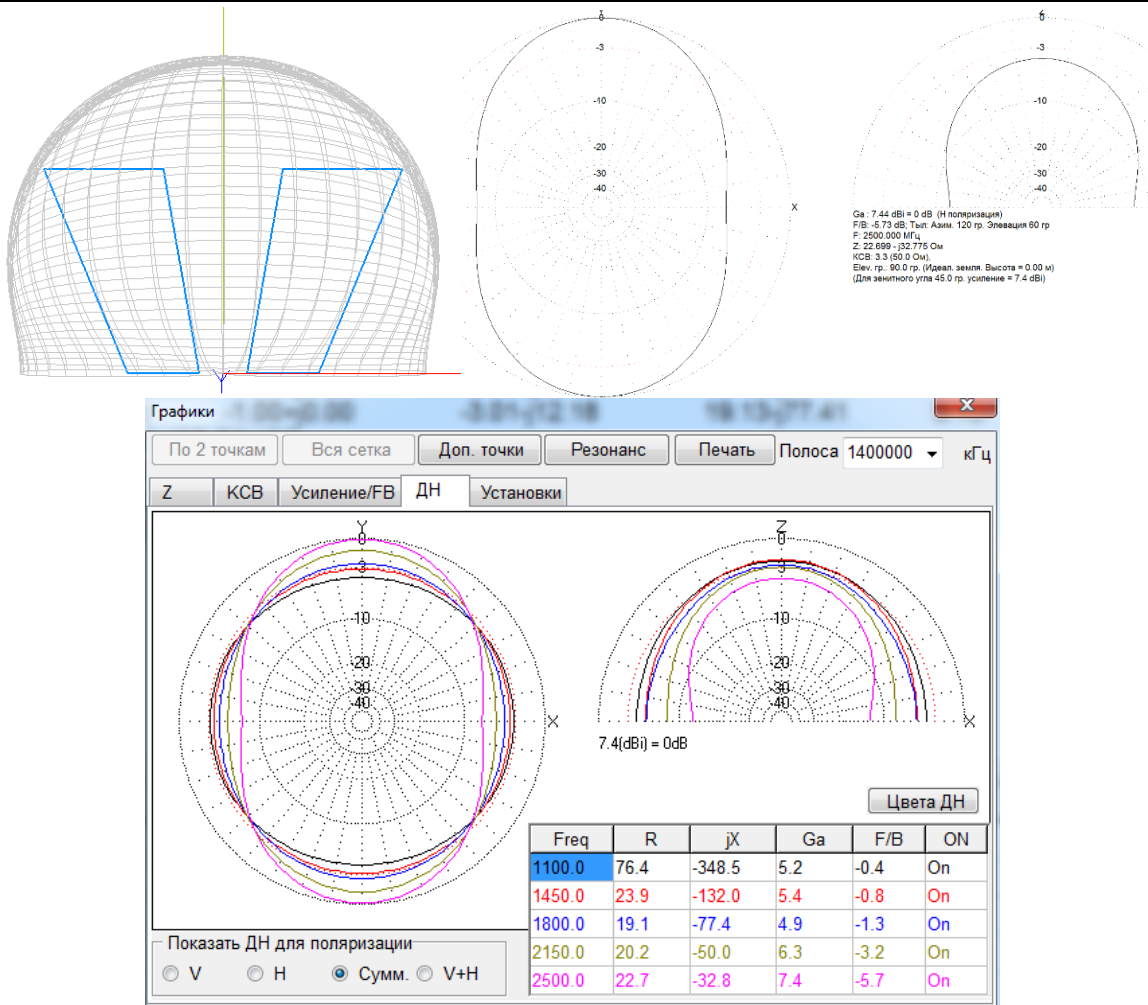


Рис. 7. Характеристики антенного элемента у випадку протифазного збудження за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)

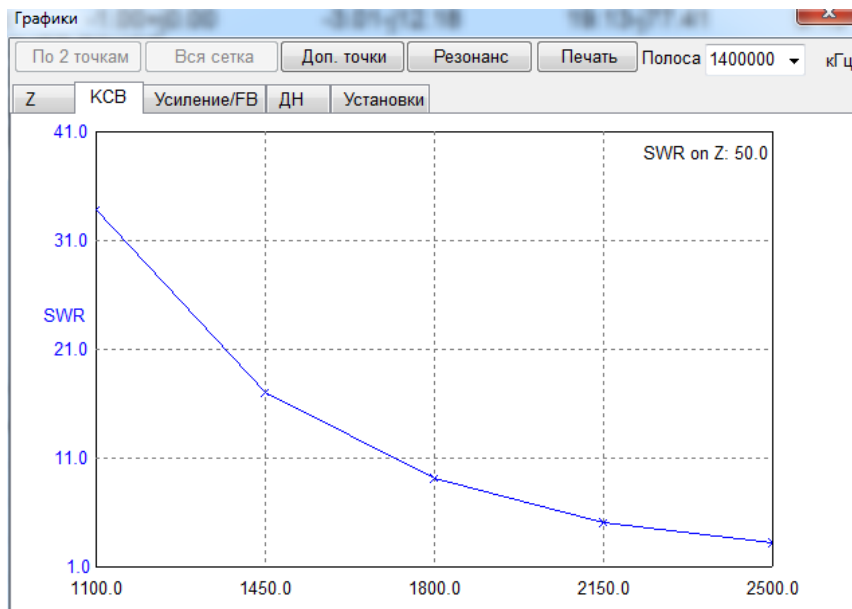


Рис. 8. Характеристики КСХН антенного элемента при протифазному збудженні за відсутності керуючих напруг (ВЧ частина)

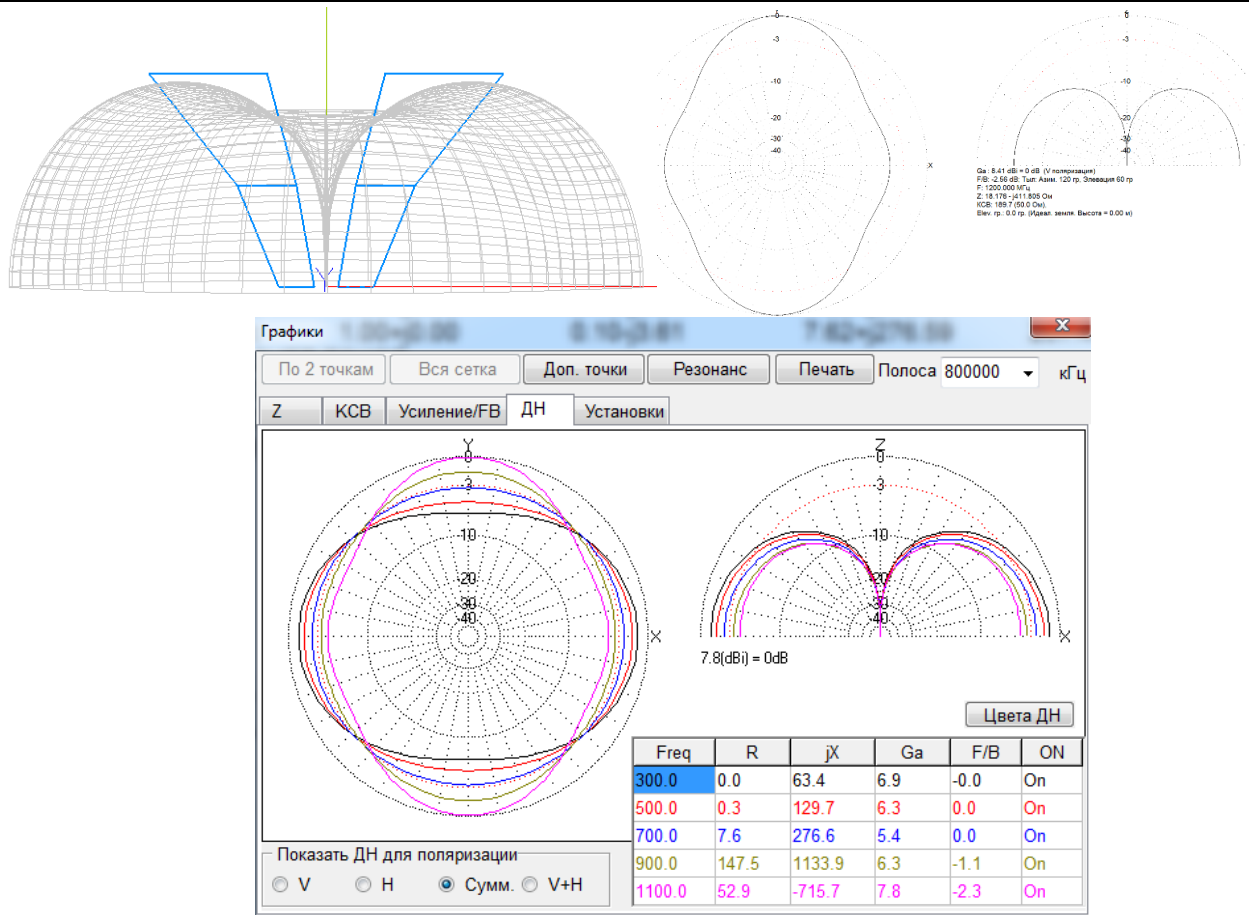


Рис. 9. Характеристики ДС антенного елемента при синфазному збудженні за наявності керуючого напруги U1 (середня частина частотного діапазону)

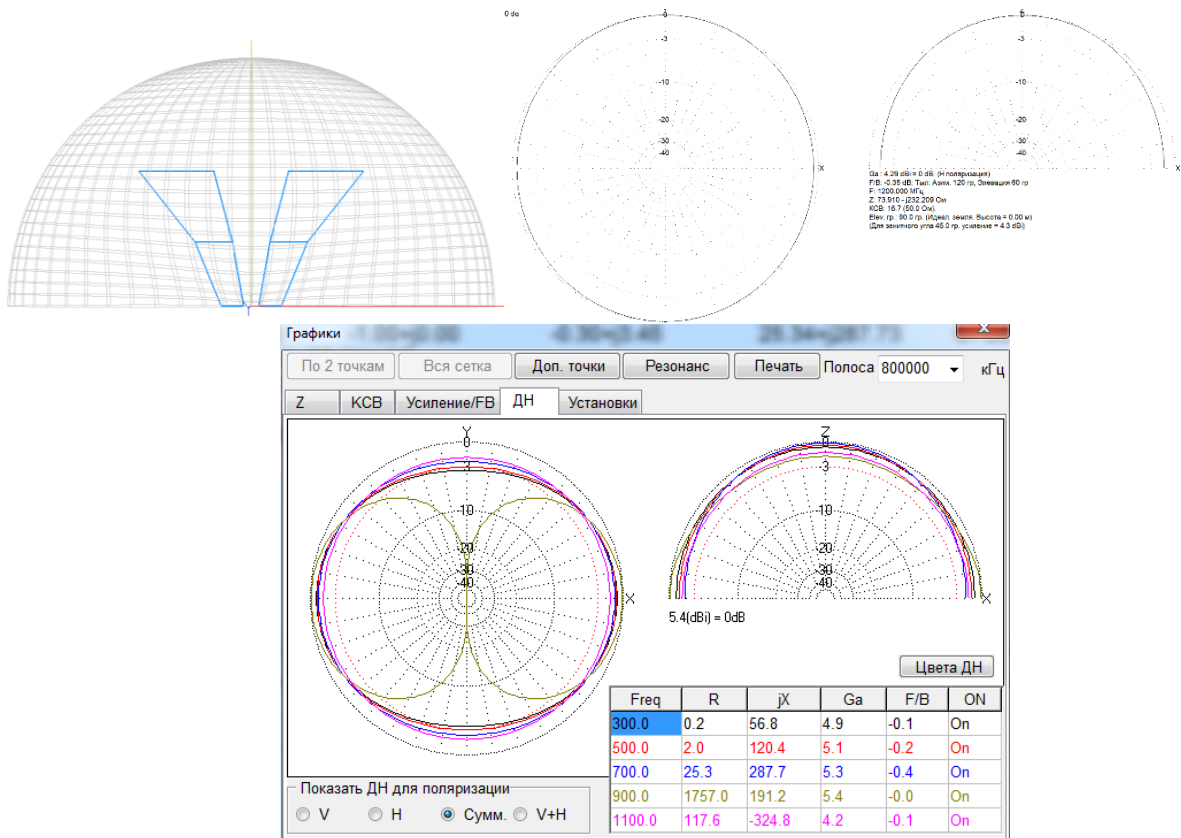


Рис. 10. Характеристики ДС антенного елемента при протифазному збудженні за наявності керуючого напруги U1 (середня частина частотного діапазону)

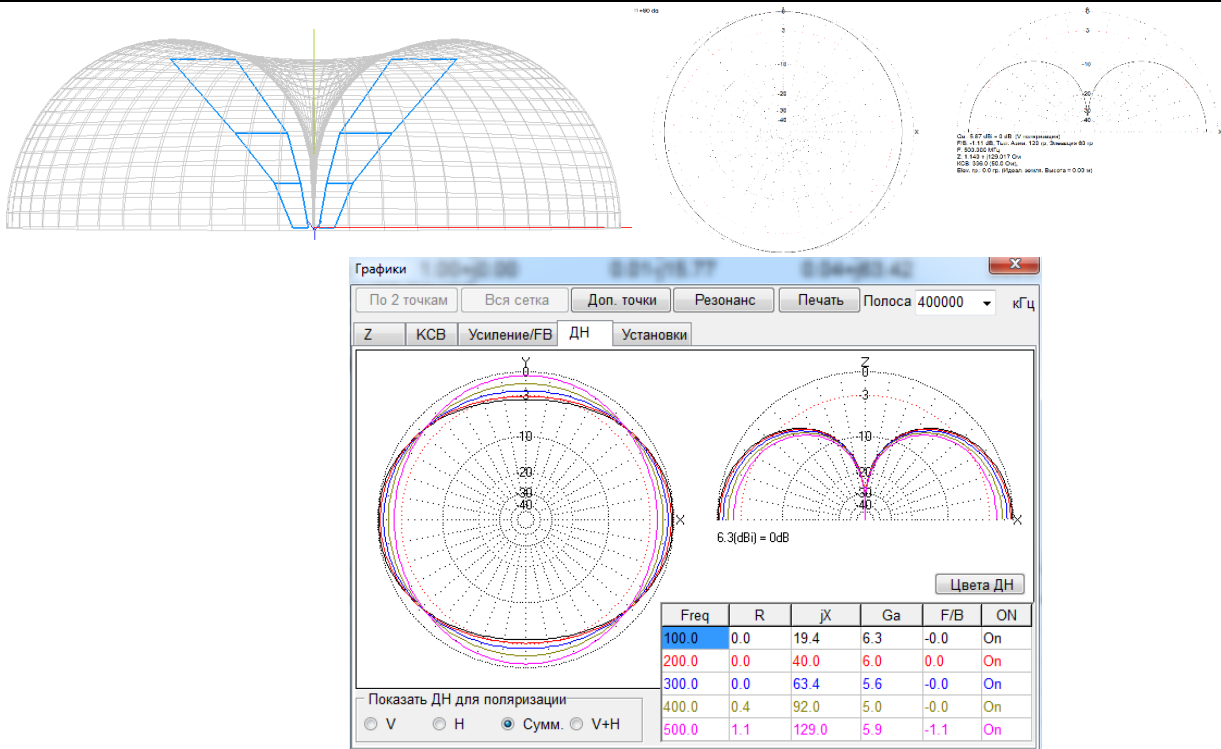


Рис. 11. Характеристики ДС антенного елемента при синфазному збудженні за наявності керуючого напруги U2 (НЧ частина робочого діапазону)

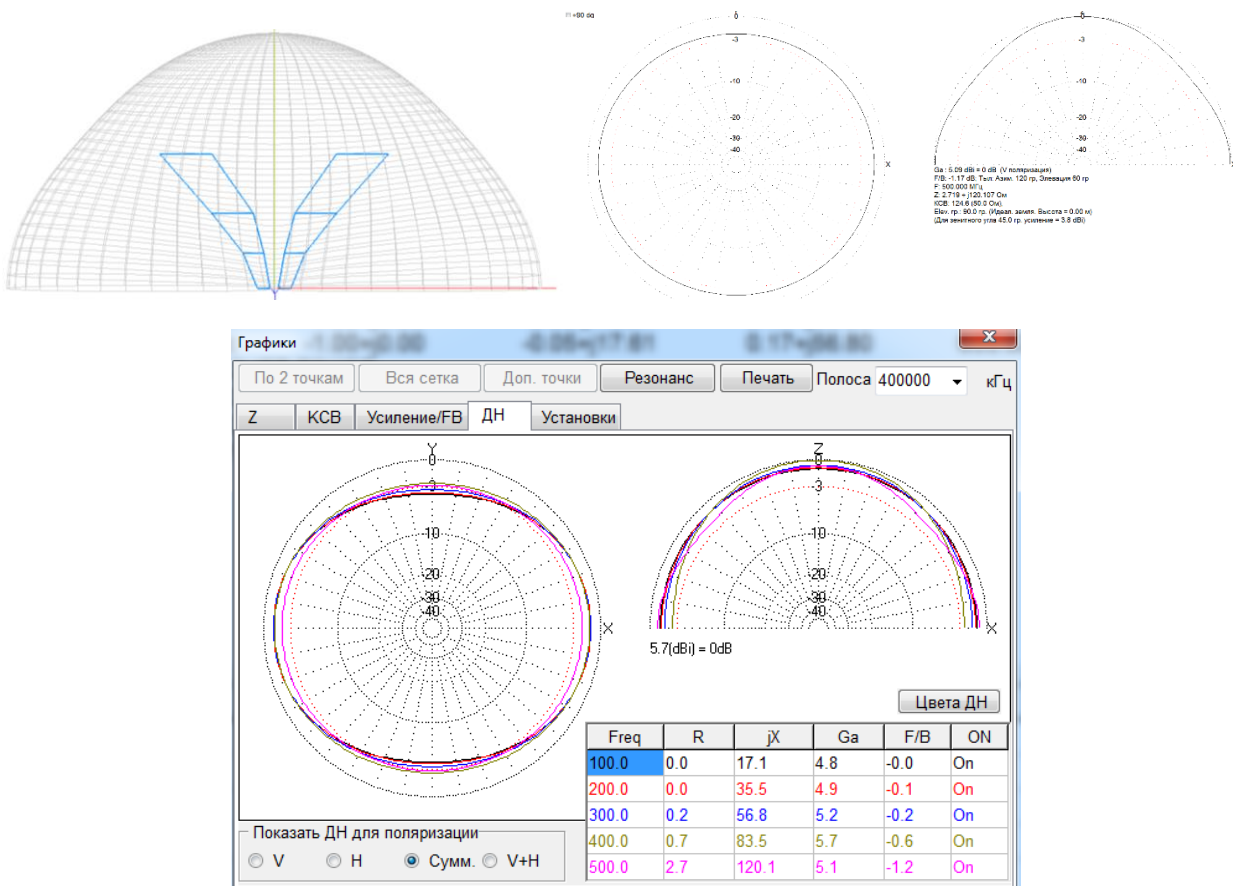


Рис. 12. Характеристики ДН антенного елемента при протифазному збудженні за наявності керуючого напруги U2 (НЧ частина)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі представлено результати розробки та моделювання широкосмугової антенної системи для пеленгації БПЛА. Дослідження охопили питання аналітичного опису антенної системи на основі прототипу – антени Вівальді. У статті наведено математичний опис моделі антенного елемента Вівальді. Встановлено експериментальну залежність між геометричними параметрами і характеристиками антени. Проведено огляд сучасного стану питання конструювання антенних систем на основі концепції побудови

надширококутних спрямованих елементів антени за відсутності фазового центру. Визначено основні тренди у сучасному проектуванні наширококутних антенних систем. Методом математичного моделювання визначено основні параметри запропонованої ширококутної антени. Досліджено параметри запропонованої антени в діапазоні частот за різних умов збудження та наведено специфіку застосування такої системи в умовах її можливої експлуатації у складі пеленгаційних комплексів БПЛА.

Література

1. Shin J. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays / J. Shin, D. H. Schaubert // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. 5. – P. 879–886.
2. Stockbroeckx B. Copolar and cross-polar radiation of Vivaldi antenna on dielectric substrate / B. Stockbroeckx, A. Vander Vorst // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48. – No. 1. – P. 19–25.
3. Boiko J. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals / J. Boiko, L. Karpova, O. Eromenko, Y. Havrylko // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – Т. 10. – № 4. – P. 4226–4236.
4. Rahmat-Samii Y. Array Feeds for Reflector Surface Distortions Compensation: Concept and Implementation / Y. Rahmat-Samii // IEEE Trans. Ant. Prop. – 1990. – Vol. 32. – P. 20–26.
5. Parhomey I. R. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar / I. R. Parhomey, J. M. Boiko, O. I. Eromenko // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2016. – Vol. 77, no. 2. – P. 75–84.
6. Appadwedula S. Direction-Finding Results for a Vector Sensor Antenna on a Small UAV / S. Appadwedula, C.M. Keller // Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing. – 2006. – P. 74–78.
7. Ghaemi K. A Small-Aperture, Ultrawideband HF/VHF Direction-Finding System For Unmanned Aerial Vehicles / K. Ghaemi, R. Ma, N. Behdad // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(10). – P. 5109–5120.
8. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.
9. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
10. 803E VHF/UHF/SHF COMINT SYSTEM [Electronic resource] / TCI INTERNATIONAL, 2004-2014. – 8 p. – Access mode: <http://www.mpssme.ae/WEB/datasheets/tci/TCI803E.pdf> (date of appeal: 30.03.2022).
11. Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE / А.А. Курушин. – М. : One-Book, 2014. – 433 с.
12. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ : учебное-пособие для вузов / [Д. И. Воскресенский, С. Д. Кременецкий, А. Ю. Гринёв, Ю. В. Котов]. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.
13. Гурский Д.Н. Вычисления в MATHCAD 12 / Д.Н. Гурский. – СПб : Питер, 2006. – 578 с.

References

1. Shin J. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays / J. Shin, D. H. Schaubert // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. 5. – P. 879–886.
2. Stockbroeckx B. Copolar and cross-polar radiation of Vivaldi antenna on dielectric substrate / B. Stockbroeckx, A. Vander Vorst // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48. – No. 1. – P. 19–25.
3. Boiko J. Evaluation of phase-frequency instability when processing complex radar signals / J. Boiko, L. Karpova, O. Eromenko, Y. Havrylko // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – Т. 10. – № 4. – P. 4226–4236.
4. Rahmat-Samii Y. Array Feeds for Reflector Surface Distortions Compensation: Concept and Implementation / Y. Rahmat-Samii // IEEE Trans. Ant. Prop. – 1990. – Vol. 32. – P. 20–26.
5. Parhomey I. R. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar / I. R. Parhomey, J. M. Boiko, O. I. Eromenko // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2016. – Vol. 77, no. 2. – P. 75–84.
6. Appadwedula S. Direction-Finding Results for a Vector Sensor Antenna on a Small UAV / S. Appadwedula, C.M. Keller // Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing. – 2006. – P. 74–78.
7. Ghaemi K. A Small-Aperture, Ultrawideband HF/VHF Direction-Finding System For Unmanned Aerial Vehicles / K. Ghaemi, R. Ma, N. Behdad // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(10). – P. 5109–5120.
8. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.
9. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
10. 803E VHF/UHF/SHF COMINT SYSTEM [Electronic resource] / TCI INTERNATIONAL, 2004-2014. – 8 p. – Access mode: <http://www.mpssme.ae/WEB/datasheets/tci/TCI803E.pdf> (date of appeal: 30.03.2022).
11. Kurushin A.A. Shkola proektirovaniya SVCh ustrojstv v CST STUDIO SUITE / A.A. Kurushin. – М. : One-Book, 2014. – 433 s.
12. Avtomatizirovannoe proektirovanie antenn i ustrojstv SVCh : uchebnoe-posobie dlja vuzov / [D. I. Voskresenskij, S. D. Kremeneckij, A. Ju. Grin'ov, Ju. V. Kotov]. – М. : Radio i svjaz', 1988. – 240 s.
13. Gurskij D.N. Vychislenija v MATHCAD 12 / D.N. Gurskij. – SPb : Piter, 2006. – 578 s.