ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРОННА ІНЖЕНЕРІЯ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES, ELECTRONIC ENGINEERING

№ 3 (2), 2023

https://doi.org/10.23939/ictee2023.02.158

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

С. Фабіровський [ORCID: 0000-0002-1497-9200], **В. Сторож** [ORCID: 0000-0002-4776-2729], **А. Соломко**

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Сергій Фабіровський (e-mail: serhii.y.fabirovskyi@lpnu.ua).

(Подано 17 серпня 2023)

У статті розв'язано задачу розроблення високоточного радіопеленгатора для виявлення джерел радіовипромінювання. В роботі обґрунтовано актуальність цих пристроїв сьогодні та окреслено сфери застосування. Розроблено два варіанти радіопеленгатора – з робочою шириною смуги частот 100 МГц та широкодіапазонний варіант із робочою смугою близько 2000 МГц. Виготовлено два макети цих радіопеленгаторів та здійснено натурні випробовування окремих вузлів пристроїв та пристроїв загалом. Результати тестування дають змогу зробити висновок, що розроблені макети забезпечують крутість пеленгаційної характеристики 8 дБ/градус, чого достатньо у разі застосування слабкоспрямованих антен. В кінці роботи висвітлено певні особливості функціонування пристроїв та рекомендації щодо їх удосконалення.

Ключові слова: *радіоелектронна розвідка; пеленг; радіопеленгатор; кільцевий міст; логоперіодична антена.*
УДК: 621.396.663

1. Вступ

Радіоелектромагнітне випромінювання є однією із основних складових сучасного технологічного прогресу [1, 2]. Широкий спектр пристроїв та систем – від безпровідного зв'язку та мереж до радіолокаційних систем – зумовлює зростання обсягів радіовипромінювання у навколишньому середовищі. Ізурахуванням цього особливо актуалізується розроблення нових методів вимірювання та аналізу параметрів радіоелектромагнітного поля з метою досягнення безпеки та надійності використання технологій, а також захисту здоров'я населення та природного середовища.

В умовах істотного поширення безпровідних систем та підвищення вимог до електромагнітної сумісності постають завдання, пов'язані із вимірюванням та контролем радіоелектромагнітного випромінювання. Наявні засоби пеленгування, хоч і ефективні, часто не можуть задовольнити вимоги до високоточного визначення розташування джерел радіовипромінювання.

Потреба у створенні нового високоточного пеленгатора визначається необхідністю удосконалення засобів вимірювання радіоелектромагнітного поля. Розвиток таких засобів та систем завжди актуальний, особливо під час війни. Високоточний пеленгатор можна використовувати для виявлення засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), розвідувальних та ударних засобів противника.

© 2023 Національний університет "Львівська політехніка"

У роботі досліджено відомі методи пеленгування. Розроблено структурну схему пеленгатора та окремі модулі для його реалізації. Здійснено тестування виготовлених макетів – пеленгатора з порівняно вузькою робочою смугою (2,4–2,5 ГГц) та широкосмугового пеленгатора 0,8–2,8 ГГц.

2. Аналіз та постановка завдання

В умовах стрімкого розвитку радіотехнологій, безпілотних апаратів та засобів радіоелектронної боротьби стає надзвичайно важливим розроблення нових методів, засобів виявлення та пеленгування джерел радіовипромінювання. Особливу увагу потрібно звернути на високу точність та ефективність пеленгаторів [1, 2] щодо виявленнябезпілотних апаратів та засобів радіоелектронної боротьби, які мають великий потенціал для застосування в різних галузях, від військової сфери до цивільних застосувань.

Останніми роками спостерігається розвиток технології програмно-конфігурованого радіо (Software-Defined Radio, SDR). Ця технологія надає можливість гнучкого та програмованого управління приймачем та забезпечення приймання та оброблення сигналів з різними видами модуляції. Це дає змогу користувачам виявляти факт здійснення передавання радіоповідомлень противником. Але, окрім виявлення факту випромінювання, важливо знати координати джерела або напрямок на нього. Для цього використовують пристрої – пеленгатори. Найпростіші пеленгатори застосовують амплітудний метод пеленгування. Для його реалізації достатньо мати спрямовану антену та SDR приймач. Повертаючи антену, можна знайти напрямок з якого сигнал буде максимальним. Недоліком цього, порівняно простого, методу є низька пеленгаційна чутливість. Це означає, що у доволі великому просторовому куті прийнятий сигнал матиме фактично однаковий рівень. Хороші результати цей метод дає у разі використання дуже вузькоспрямованої антени з голкоподібною діаграмою спрямованості, що доцільно, коли здійснюється сканування у діапазонах сантиметрових та міліметрових хвиль. Але реалізувати таку антену широкодіапазонною та з прийнятними габаритами на частотах 400–1000 МГц неможливо. Отже, варто досліджувати інші методи пеленгування та удосконалювати їх, щоб створити метод, оптимальний для сучасних вимог, який дасть змогу отримати пеленгаційну характеристику з високою крутістю із використанням порівняноно малогабаритних слабкоспрямованих антен.

3. Синтез структурної схеми розроблюваного пеленгатора

Для розроблення високоточного пеленгатора спочатку потрібно синтезувати його структурну схему. Одним із головних елементів пеленгатора є антенна система, яка забезпечує важливі параметри пристрою:

- пеленгаційну характеристику;
- чутливість;
- частотний діапазон;
- поляризацію.

Для амплітудних методів пеленгування, таких як метод максимуму та метод мінімуму, можна використовувати лише одну антену, але методу максимуму притаманні недоліки, описані в попередньому пункті. Метод мінімуму має хорошу пеленгаційну характеристику, але недостатню чутливість.

Пропонуємо використовувати для пеленгування модифікований фазовий метод пеленгування. Для його реалізації потрібні дві ідентичні антени та кільцевий міст. Кільцевий міст має чотири порти: два порти для підключення антен, сумарний порт та різницевий порт. Через сумарний порт ці дві антени збуджуються синфазно, через різницевий – протифазно. А оскільки ці пристрої є взаємними, те саме отримуємо і в режимі приймання. В результаті, підключившись до сумарного виходу кільцевого моста, можна отримати діаграму спрямованості з максимом в напрямку на

шуканий об'єкт. Звичайно, сумарна діаграма спрямованості не забезпечуватиме високоточного пеленгування. Натомість на різницевому виході отримаємо діаграму спрямованості з мінімумом по центру, крутість пеленгаційної характеристики буде високою, а це означає, що у разі зміни кута повороту антенної системи на невеликий кут рівень сигналу на різницевому виході кільцевого моста істотно зміниться. Відтак запропоновано від пеленгаційної характеристики з сумарного виходу відняти пеленгаційну характеристику з різницевого виходу. В результаті отримаємо одночасно і високий рівень вихідного сигналу, і пеленгаційну характеристику з великою крутістю.

На рис. 1 та рис. 2 зображено два варіанти синтезованих структурних схем пеленгатора.

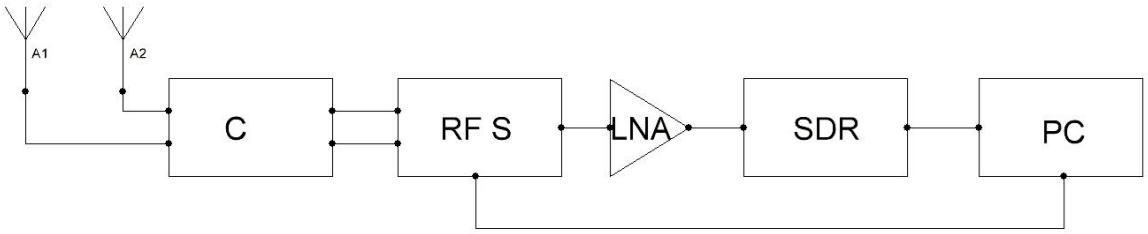


Рис. 1. Структурна схема пеленгатора

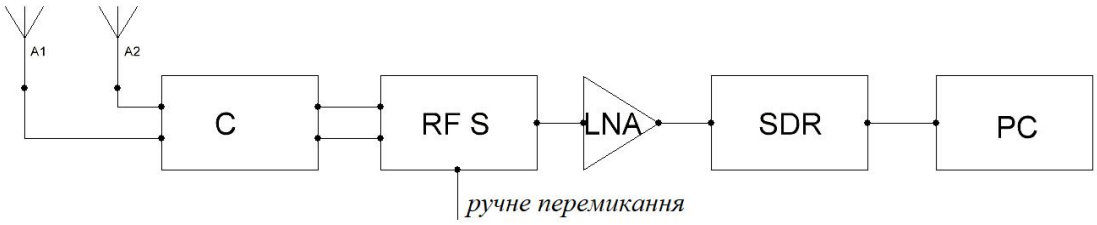


Рис. 2. Спрощена структурна схема пеленгатора

Елементи на рис. 1, 2: C – кільцевий міст, RF S – радіочастотний електронний ключ, LNA – малошумний підсилювач радіосигналу, SDR – програмно-конфігуроване радіо, PC – персональний комп'ютер.

Спільним для обох схем є те, що обидва сигнали із виходів кільцевого моста подаються на радіочастотний ключ, відтак сигнал через малошумний підсилювач надходить на SDR приймач, дані з нього зчитує персональний комп'ютер. Відмінність полягає у тому, що на рис. 1 зображено схему з автоматичним перемиканням ключа, а на рис. 2 – із ручним перемиканням. Використання радіочастотного ключа дає змогу зменшити вартість пристрою але водночас такий підхід не може дати інформацію про те, з якого боку джерело випромінювання, тому потрібно сканувати весь простір навколо. Якщо додати другий SDR приймач, цей недолік можна усунути, і ключ не потрібно використовувати, оскільки можна буде одночасно зчитувати дані з двох виходів кільцевого моста.

4. Розроблення елементів пеленгатора

Розглянемо розроблення антенного сенсора, який реалізує модифікований метод пеленгування і працює у частотному діапазоні 2,4–2,5 ГГц. Фазовий метод пеленгатора ґрунтується на вимірювання різниці фаз електромагнітних коливань, які приймають дві рознесені в просторі антени.

Сенсор складається із двох патч-антен, а також кільцевого моста. Для виготовлення сенсора пропонуємо використати армований фторопласт ФАФ-4Д з товщиною діелектрика 1,5 мм, діелектрична проникність $\varepsilon = 2{,}6$, $\mathrm{tg}\delta = 10^{-4}$.

Для додавання чи віднімання фаз високочастотних сигналів найзручніше використовувати кільцевий спрямований відгалужувач, перевагою якого є простота реалізації у смужковому виконанні.

Кільцевий спрямований відгалужувач – це восьмиполюсник, в основі якого замкнена смужкова лінія, електрична довжина якої становить півтори довжини хвилі. Він являє собою згорнуту в кільце лінію передавання завдовжки $3\lambda_л/2$, в яку з інтервалом $\lambda_л/4$ увімкнені чотири вхідні лінії передачі. Кільцевий спрямований відгалужувач можна реалізувати на будь-яких лінях, залежно від конструктивних вимог і частотного діапазону. Для прикладу на рис. 3 наведено топологію кільцевого моста у смужковому виконанні.

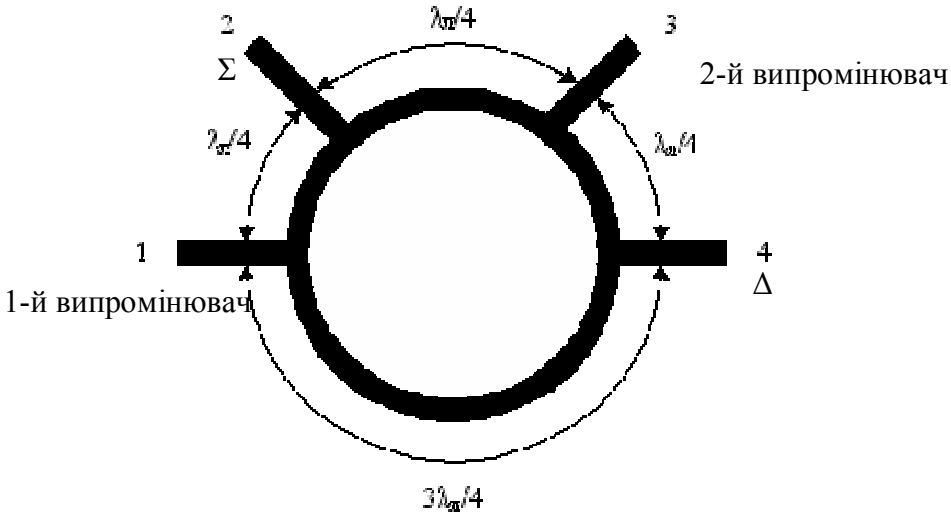


Рис. 3. Топологія кільцевого моста у смужковому виконанні та призначення його входів

Якщо одночасно збуджувати кільцевий міст синфазними сигналами з плеча 1 (перший випромінювач) і з плеча 3 (другий випромінювач), то на виході плеча 2 (Σ) ці сигнали додадуться, а на виході плеча 4 (Δ) віднімуться [3], що й забезпечує одночасне формування сумарної та різницевої діаграм спрямованості пеленгатора.

Для забезпечення оптимальних параметрів кільцевого моста хвильовий опір кільцевої лінії повинен бути в $\sqrt{2}$ більшим, ніж хвильовий опір основних ліній. З конструктивних міркувань його реалізовано на лініях з хвильовим опором 70 і 100 Ом, що дало змогу звузити ширини смужкових ліній і забезпечило зниження їх паразитного випромінювання. У разі використання матеріалу ФАФ-4Д з товщиною 1,5 мм фідерна лінія з хвильовим опором 100 Ом повинна мати ширину приблизно 1,1 мм, а з хвильовим опором 70 Ом – 2,4 мм. Фідерну лінію із хвильовим опором 100 Ом використано для реалізації кільцевого моста, а з хвильовим опором 70 Ом для під'єднання моста до патч-антен.

За відомих хвильових опорів і ширин смужкових ліній розрахунок шлейфового подільника зводиться до розрахунку довжин його відрізків з урахуванням ефективної діелектричної проникності. Для лінії завширшки 1,1 мм з хвильовим опором 100 Ом ефективна діелектрична проникність матиме таке значення:

$$\varepsilon_{ТР} = \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2}\cdot\left(1+12\cdot\frac{h}{w}\right)^{-0,5} = \frac{2,6+1}{2} + \frac{2,6-1}{2}\cdot\left(1+12\cdot\frac{1,5}{1,1}\right)^{-0,5} \approx 2,0\,, \qquad (1)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу; h – висота підкладки матеріалу; w – ширина доріжки.

Отже, для такої лінії, згідно з (1), вона становить 2. Тоді довжина лінії дорівнює:

$$L_K = \frac{1,5 \cdot \lambda}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ТР}}}} = \frac{1,5 \cdot c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{ТР}}}} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,0}} \approx 0,127 \text{ м.} \quad (2)$$

Віддаль між входами повинна дорівнювати чверті довжини хвилі, що для цього частотного діапазону становить 21,2 мм.

Ширина 70-омних ліній була визначена раніше – 2,4 мм. Макет антенної системи радіопеленгатора за фазовим методом подано на рис. 5. Для зменшення габаритів кільцевий міст було стиснуто.

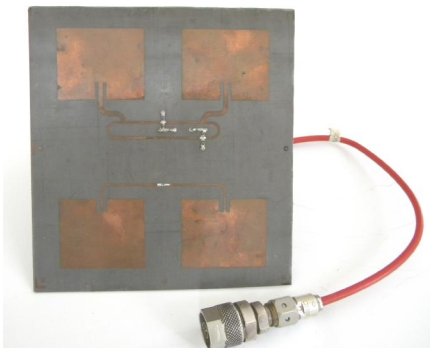


Рис. 5. Макет антенної системи радіопеленгатора за фазовим методом

У цьому макеті в точці А формується різницевий сигнал, а в точці Б сумарний сигнал від двох приймальних патч-антен, які зображено на верхній частині рис. 5. Нижні дві патч-антени передбачені для активного варіанта пеленгаційного сенсора. В цій роботі розглянуто лише пасивний варіант і вплив цих антен на технічні показники відсутній.

5. Розроблення широкодіапазонного варіанта пеленгатора для виявлення джерел радіовипромінювання

У попередньому пункті розроблено сенсор пеленгатора, який працює у порівняно вузькій смузі частот, це пояснюється тим, що патч-антена виконана на друкованій платі, завтовшки всього 1,5 мм, і має смугу робочих частот не більше ніж 100 МГц. Відповідно і класичний кільцевий міст на цих частотах має смугу 400–500 МГц. Тому постало завдання розроблення широкодіапазонного пеленгатора, який би міг працювати в діапазоні від 850 до 2900 МГц. Робоча смуга частот такого пеленгатора повинна становити близько 2000 МГц. Для побудови макета використано дві готові логоперіодичні антени, здатні працювати в діапазоні від 800 до 6000 МГц, а також спеціально розроблено широкодіапазонний кільцевий міст.

На рис. 6 зображено 3Д вигляд моделі розробленого кільцевого моста в середовищі CST Studio [4].

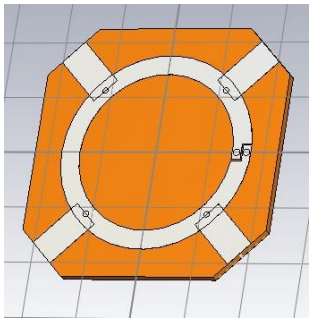


Рис. 6. Вигляд моделі кільцевого моста у середовищі моделювання CST Studio

Топологія розробленого кільцевого моста двостороння, з використанням механічного фазообертача на 180º, що дало змогу зменшити загальну довжину кільця і забезпечило розширення смуги пропускання. У результаті габаритні розміри становлять 44×44 мм для матеріалу підкладки ФАФ-4Д.

На рис. 7 зображено S-параметри розробленого моста.

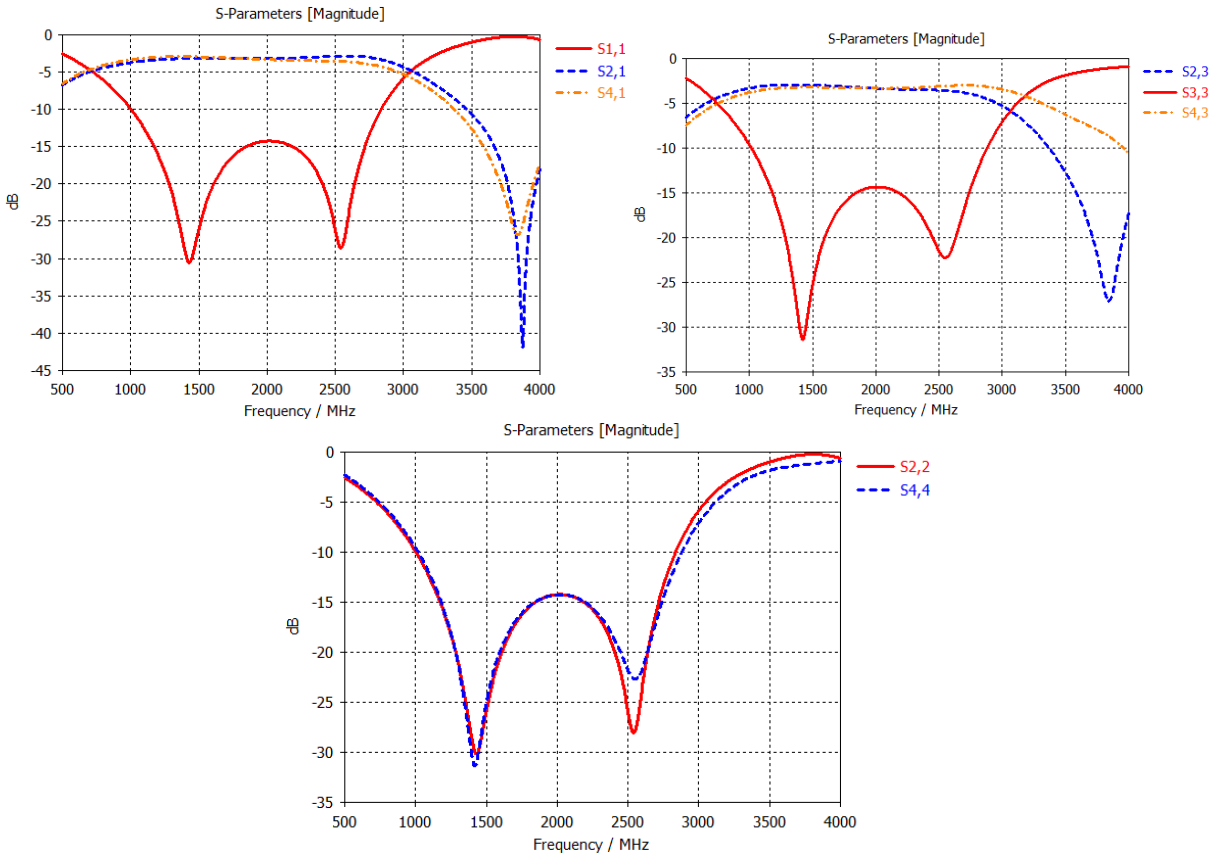
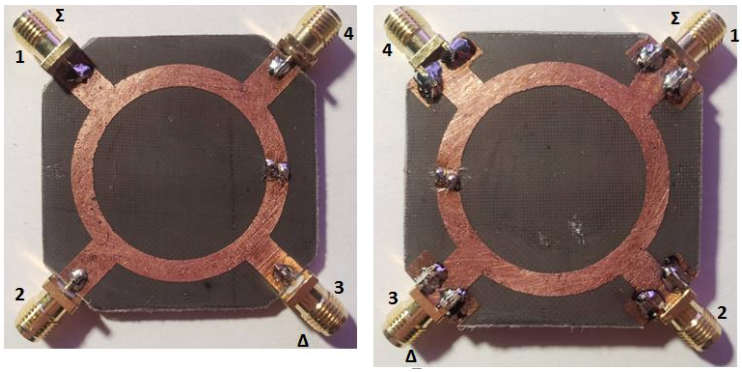


Рис. 7. S-параметри розробленого кільцевого моста, розраховані в середовищі CST Studio

На рис. 8 зображено виготовлений кільцевий міст: вихід сумарного сигналу позначено номером 1, різницевий – 3. Порти 2 та 4 призначені для підключення логоперіодичних антен.



а *б*

Рис. 8. Вигляд кільцевого моста: а – зверху; б – знизу

Для усунення паразитного випромінювання кільцевий міст поміщено в захисний екран.

Далі за допомогою векторного аналізатора кіл отримано експериментальні значення S-параметрів розробленого моста, наведені на рис. 9.

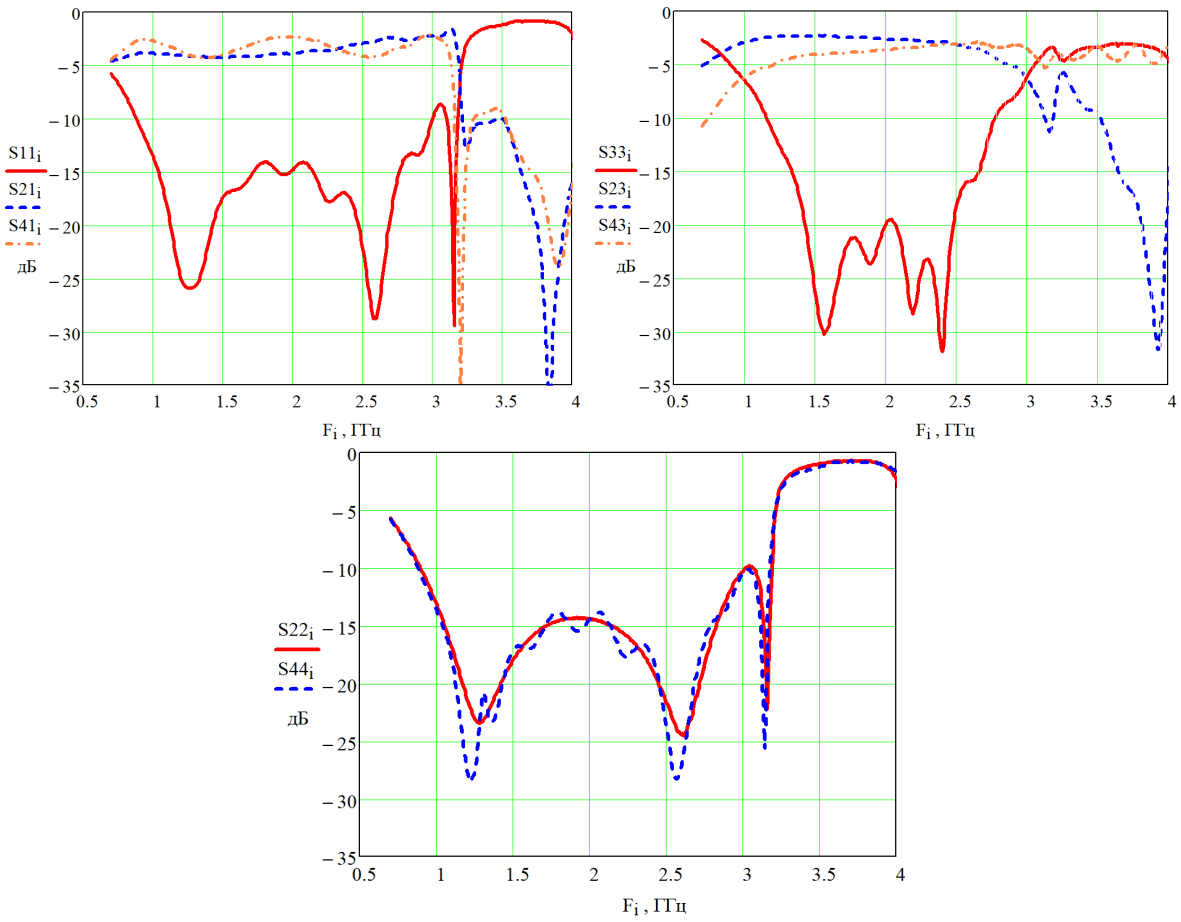


Рис. 9. S-параметри розробленого кільцевого моста, отримані під час тестування реального макета

Порівнюючи рис. 7 та рис. 9, можна зробити висновок, що характеристики великою мірою збігаються і забезпечується потрібна смуга робочих частот.

Для кільцевого моста також важливі фазо-частотні характеристики (ФЧХ) на сумарному та різницевому каналах. ФЧХ зображено на рис. 10.

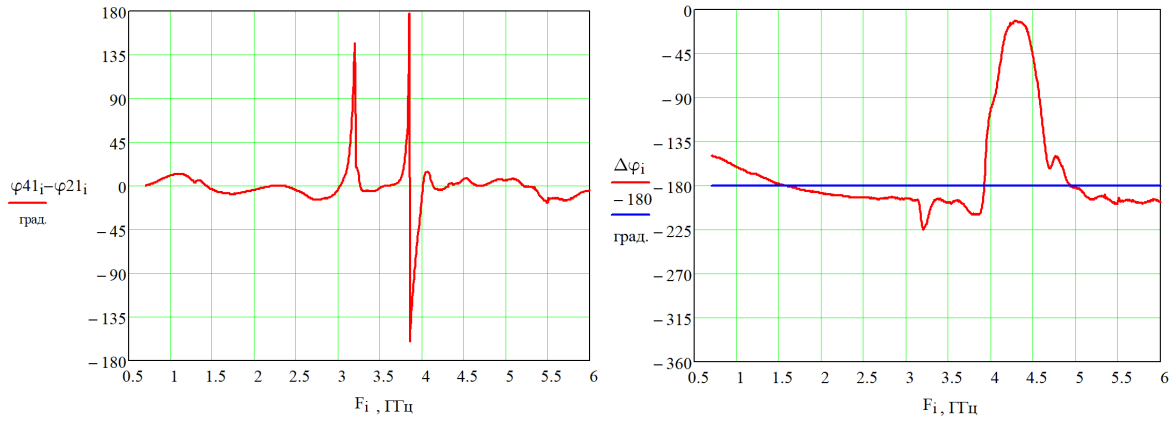


Рис. 10. ФЧХ на сумарному та різницевому каналах

Як видно з рис. 10, ФЧХ у робочому діапазоні притаманна деяка нелінійність, що впливатиме на параметри діаграми спрямованості антенної системи, а саме кутовий напрямок максимуму та мінімуму в діаграмах спрямованості по сумарному та, відповідно, різницевому каналах. Однак це легко компенсувати під час калібрування пристрою.

6. Результати експериментального дослідження макета радіопеленгатора на основі фазового методу пеленгування

Виконано тестування розробленого в п. 4 макета. З макета знято два сигнали з точки А і Б (рис. 5), відповідно різницю сигналів і суму сигналів із двох приймальних антен.

$$\Theta E := \begin{pmatrix} -60 \\ -50 \\ -40 \\ -30 \\ -20 \\ -10 \\ 0 \\ 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \end{pmatrix} \quad EXP\Sigma := \begin{pmatrix} 0.026 \\ 0.09 \\ 0.258 \\ 0.493 \\ 0.786 \\ 0.927 \\ 1 \\ 0.887 \\ 0.737 \\ 0.6 \\ 0.289 \\ 0.14 \\ 0.056 \end{pmatrix} \quad EXP\Delta := \begin{pmatrix} 0.469 \\ 0.565 \\ 0.65 \\ 0.669 \\ 0.617 \\ 0.332 \\ 0 \\ 0.291 \\ 0.568 \\ 0.705 \\ 0.666 \\ 0.59 \\ 0.484 \end{pmatrix}$$

Рис. 11. Результати тестування макета з п. 4

За цими результатами побудовано залежності за допомогою програми Mathcad [5]. На рис. 12 наведено залежність амплітуди сигналу на виході сумарного та різницевого каналів. Експериментальні дані відображено кружечками, суцільною лінією – теоретична залежність для цієї антенної системи.

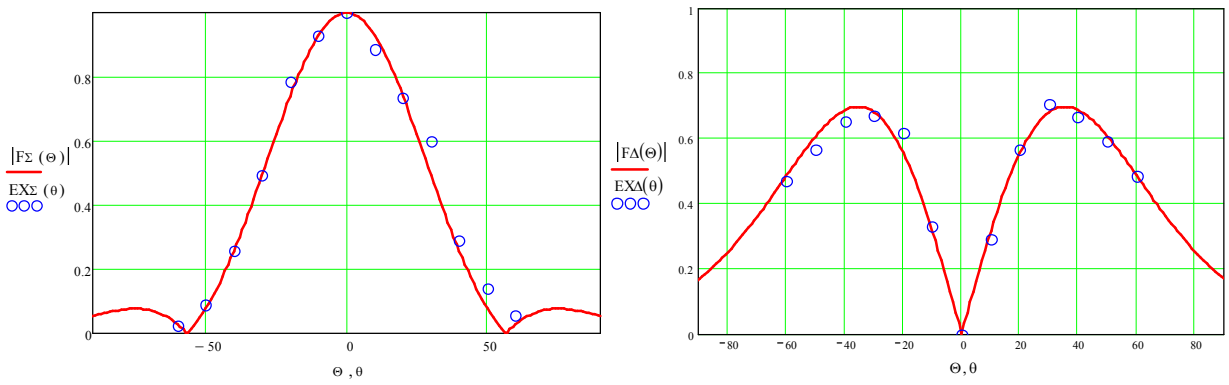
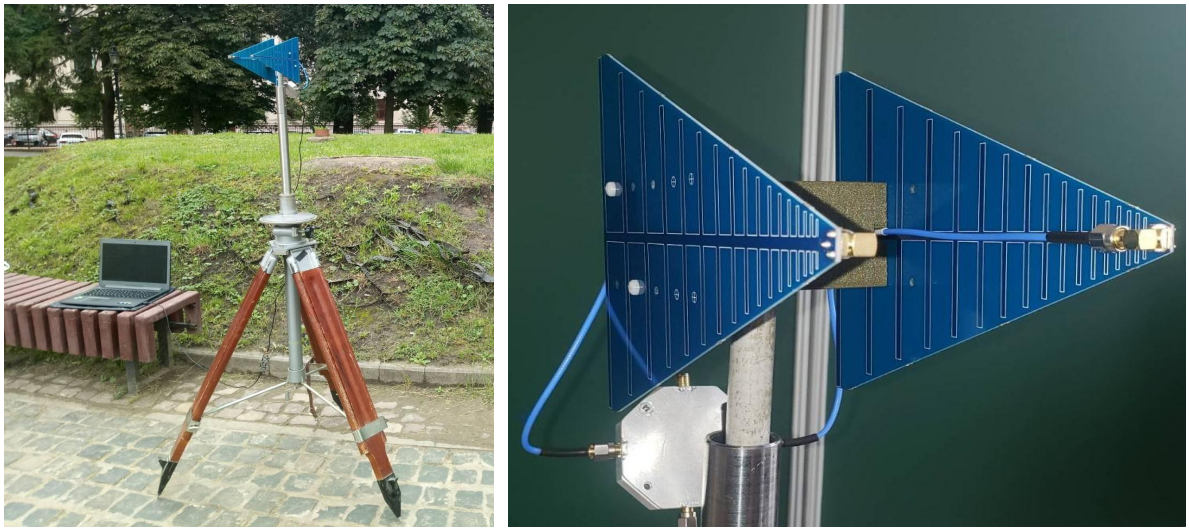


Рис. 12. Результати тестування макета з п. 4, сумарний канал

З графіків на рис. 12 чітко видно, що мінімальне значення сигналу різницевого каналу збігається із максимумом сумарного, а практичні результати – із теоретичними.

7. Результати тестування широкодіапазонного варіанта пеленгатора

Для тестування розробленого пристрою зібрано спрощену конфігурацію пеленгаційної системи зображена на рис. 2. На рис. 13, а зображено зібраний стенд для тестування, на рис. 13, б – антенну систему з кільцевим мостом. Джерело радіосигналу працює на частоті 1240 МГц.



а *б*

Рис. 13. Загальний вигляд стенда для тестування (а) та антенної системи з кільцевим мостом (б)

До антенної системи підключено SDR приймач SDRplay RSP1A. Дані збирали, повертаючи антенну систему за допомогою поворотного механізму відносно джерела випромінювання, рівні сигналу отримували з програмного середовища SDRplay. Одержано результати у вигляді кількох масивів, які містять значення кута повороту та рівня сигналу із різницевого та сумарного каналів.

На рис. 14 зображено два графіки, побудовані на основі отриманих даних.

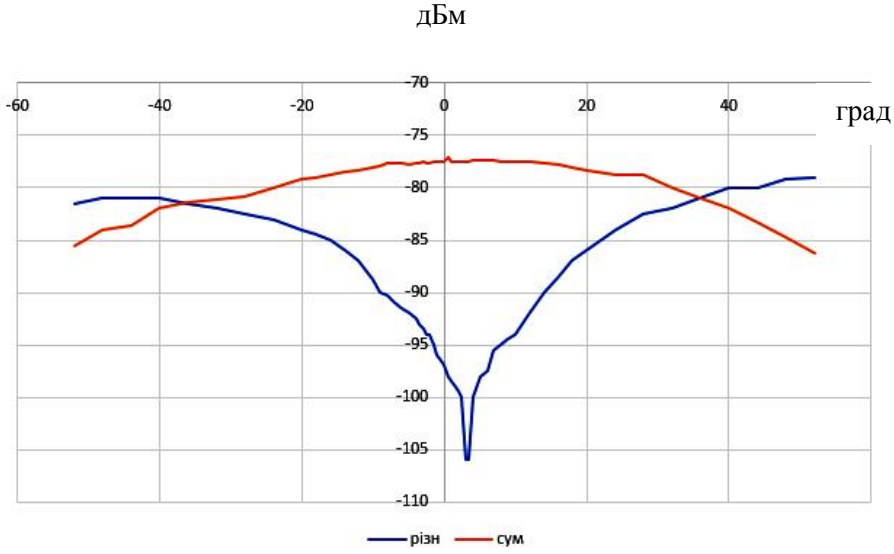


Рис. 14. Результати тестування макета з п. 5, різницевий та сумарний канали

З рис. 14 видно, що використання різницевого каналу дає істотні переваги, оскільки, порівняно із сумарним каналом, рівень сигналу в разі наведення антенної системи на об’єкт, який випромінює радіохвилі (РО), істотно змінюється, що дає змогу підвищити точність визначення напрямку на РО. Щоб усунути можливі мінімуми в діаграмі спрямованості різницевого каналу, пропонуємо, як зазначено вище, відняти масив значень різницевого каналу від масиву значень сумарного. Результат подано на рис. 15.

За результатами експерименту крутість пеленгаційної характеристики становить 8 дБ/градус, що забезпечує високу точність визначення напряму на РО.

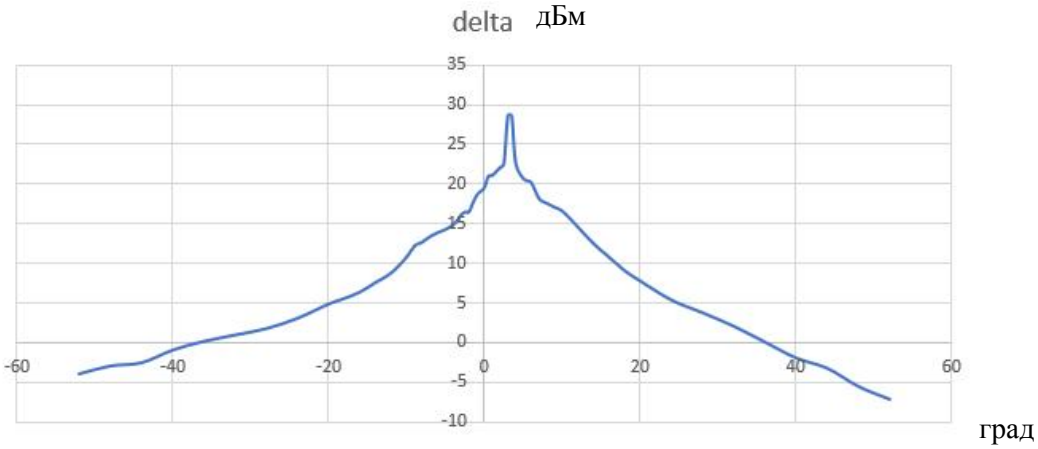


Рис. 15. Остаточний результат вимірювань

8. Аналіз обмежень розроблених пеленгаторів та майбутні плани

Під час реалізації широкодіапазонних пеленгаторів необхідно враховувати, що оптимальна відстань між двома антенами повинна становити приблизно 0,6λ. Це можна забезпечити для порівняно вузької смуги частот. Під час роботи немає можливості механічно змінювати відстань між антенами, тому, у разі пеленгування джерел на вищих частотах, електрична відстань між ними зростатиме. Це спричинить неоднозначність у визначенні напрямку за рахунок формування декількох основних пелюсток у діаграмі спрямованості, тобто дифракційних максимумів.

Результат моделювання сумарної та різницевої діаграм спрямованості в полярній і прямокутній системах координат, за відстані між антенами 1,5λ, наведено на рис. 16.

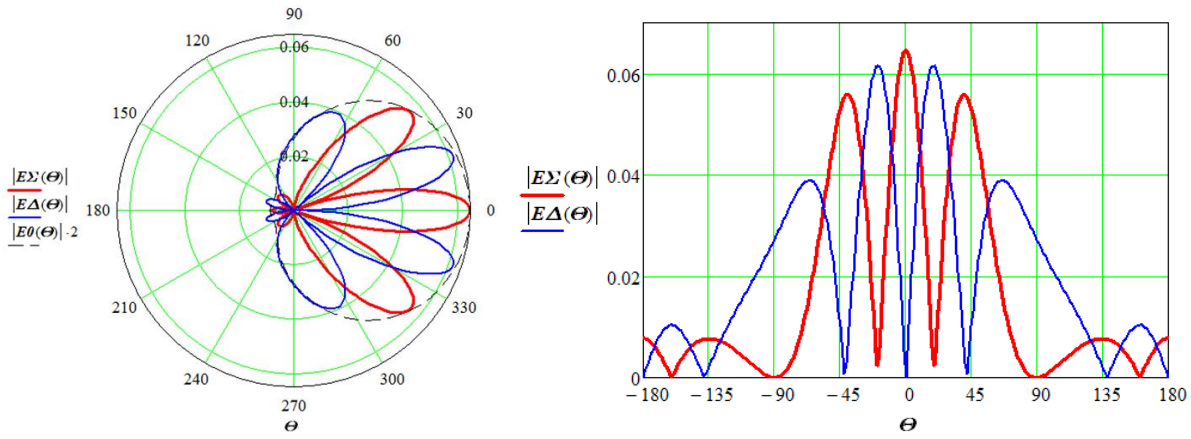


Рис. 16. Діаграми за відстані між антенами 1,5λ

Як видно з рис. 16, окрім основного напрямку пеленгування під кутом 0º, виникли ще два паразитних під кутами приблизно 40º і 320º для полярної системи координат, або 40º і –40º на графіку в прямокутній системі координат.

Щоб позбавитись такого ефекту, пропонуємо полотна двох логоперіодичних антен встановити під кутом так, щоб у разі зміни робочої частоти електрична відстань між їх активними зонами випромінювання залишалася сталою. В нашому випадку цей кут становить 30º. Результуючу діаграму зображено на рис. 17. Як бачимо, сумарна діаграма спрямованості дещо спотворена, зате для будь-яких частот в нашому діапазоні вищезгаданий ефект не виникає.

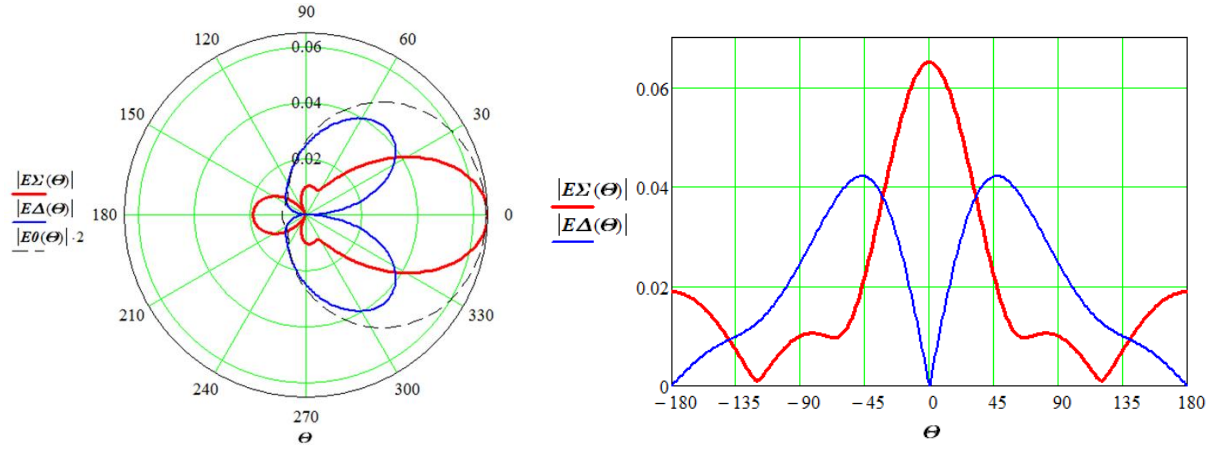


Рис. 17. Результуюча діаграма спрямованості

Висновки

Розроблено високоточний радіопеленгатор для виявлення джерел радіовипромінювання. В роботі обгрунтовано актуальність цих пристроїв сьогодні та окреслено сфери їх застосування. Розроблено два варіанти радіопеленгатора – з робочою шириною смуги частот 100 МГц та широкодіапазонний варіант із робочою смугою близько 2000 МГц. Розроблено антенний сенсор, який містить кілька патч-антен та кільцевий міст, ці елементи розміщені на одній друкованій платі, що спрощує виробництво.

Розроблено широкодіапазонний кільцевий міст, виконано його моделювання та виготовлено тестовий зразок. Отримані параметри під час моделювання і реального їх вимірювання на тестовому зразку практично збігаються.

Виготовлено два макети цих радіопеленгаторів та проведено натурні випробовування окремих вузлів пристроїв та пристроїв загалом. Результати тестування продемонстрували працездатність макетів та правильність прийнятих технічних рішень. За результатами експерименту крутість пеленгаційної характеристики дорівнювала 8 дБ/градус, що забезпечує високу точність визначення напряму на РО. В кінці роботи наведено певні особливості функціонування широкодіапазонних пеленгаційних пристроїв та рекомендації щодо їх удосконалення.

Список використаних джерел

[1] *Valdez Kevin (2021), "Radio Direction Finding Implementing Music Algorithm With Usrp Node Arrays", Open Access Theses & Dissertations. 3457. https://scholarworks.utep.edu/open_etd/3457*

[2] *R. Schmidt (1986), "Multiple emitter location and signal parameter estimation", in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 34, No. 3, pp. 276–280. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830.*

[3] *Rat Race Coupler. Available at https://www.oreilly.com/library/view/rf-and-microwave/9781118349571/c06_level1_9.xhtml (Accessed 8 June 2023).*

[4] *CST Studio Suite. Available at https://edu.3ds.com/en/software/cst-studio-suite-learning-edition (Accessed 8 June 2023).*

[5] *Mathcad. Available at https://www.mathcad.com/en (Accessed 8 June 2023).*

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A HIGH-PRECISION DIRECTION FINDER FOR RADIO EMISSION SOURCES DETECTING

Sergiy Fabirovskyy, Volodymyr Storozh, Andriy Solomko

Lviv Polytechnik National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

This article is devoted to solving the problem of developing a high-precision radio direction finder for radio emission sources detecting. The paper substantiates the relevance of these devices to date and identifies areas of application. Two versions of the direction finder have been developed - with an operating bandwidth of 100 MHz and a wide-range version with an operating band of about 2000 MHz. Two layouts of these radio direction finders were made, and full-scale tests of individual units of devices and devices as a whole were carried out. The test results allow us to conclude that the developed layouts provide a direction finding characteristic curvature of 8 dB/degree, which is sufficient when using weakly directional antennas. At the end of the work, certain features of the functioning of the devices and recommendations for their improvement are presented.

Key words: *electronic signals intelligence; bearing; radio direction finder; rat-race coupler; log-periodic antenna.*