

# Амплітудний пеленгатор джерел радіовипромінювання для безпілотного літального апарату

Бугайов М. В.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м. Житомир, Україна

E-mail: karunen@ukr.net

Виявлення та локалізація малопотужних джерел радіовипромінювання (ДРВ) у населених пунктах із використанням стаціонарних засобів радіомоніторингу (РМ) є малоефективним у зв'язку з відсутністю прямої видимості через ефект затінення. Для вирішення даної проблеми засіб РМ доцільно розмістити на малорозмірному безпілотному літальному апараті (БпЛА). Обмеженнями такого рішення є малий час на збирання та оброблення даних та невисока обчислювальна потужність засобу РМ. Це призводить до зниження пошукових можливостей засобу РМ як за просторовими координатами, так і за частотою, що в умовах високої щільності ДРВ є критично важливим. Метою статті є підвищення швидкості пошуку ДРВ із використанням розміщеного на БпЛА засобу РМ в умовах часових, масогабаритних та енергетичних обмежень за рахунок використання системи широкосмужових спрямованих антен та багатоканального послідовного оброблення сигналів. Для оцінювання напрямку приходу радіохвилі з огляду на масогабаритні та обчислювальні обмеження розміщеного на БпЛА засобу РМ обрано амплітудний метод пеленгування. Запропонована структура антенної системи містить шість рознесених по колу на  $60^\circ$  логоперіодичних антен. Для оброблення прийнятого сигналу запропоновано схему багатоканального послідовного аналізу, в якій один скануючий приймач по чергово підключається до кожної з антен. Показано, що для даної схеми параметром, який підлягає оптимізації, є швидкість польоту БпЛА. Наведено узагальнений вираз для розрахунку даного значення. Отримано значення параметрів для апроксимації головної пелюстки діаграми спрямованості логоперіодичної антени у вигляді кривої Гаусса. Розроблено процедуру розрахунку напрямку на ДРВ шляхом порівняння амплітуд прийнятих сигналів двома сусідніми антенами. Окреслено шляхи для уникнення неоднозначностей розрахунку пеленгів для випадку кількох ДРВ. У порівнянні з існуючими рішеннями, коли використовується один приймальний канал з однією спрямованою антеною, а сканування простору здійснюється шляхом обертання БпЛА, запропонований підхід із багатоантенною системою забезпечить скорочення часу на огляд азимутальних напрямків.

*Ключові слова:* амплітудний пеленгатор; джерело радіовипромінювання; безпілотний літальний апарат; радіомоніторинг; скануючий приймач

DOI: [10.20535/RADAR.2025.99.41-48](https://doi.org/10.20535/RADAR.2025.99.41-48)

## 1 Постановка проблеми

В умовах постійного збільшення кількості малопотужних радіоелектронних випромінюючих засобів зростає також щільність їх розміщення, особливо у великих населених пунктах. Це створює передумови до ускладнення радіоелектронної обстановки та погіршення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, а також суттєво ускладнює проведення радіоконтрольних вимірювань та пошук несанкціонованих джерел радіовипромінювання (ДРВ).

Виявлення та визначення місцеположення таких ДРВ із використанням стаціонарних засобів радіомоніторингу (РМ) є малоефективним у зв'язку з

відсутністю прямої видимості через ефект затінення. Для локалізації ДРВ у таких умовах засіб РМ доцільно розмістити на малорозмірному безпілотному літальному апараті (БпЛА) і реалізувати збирання даних про параметри ДРВ в деякій області простору шляхом її обльоту з подальшим аналізом прийнятих сигналів. Особливістю такого рішення є обмежений час на збирання та оброблення даних, що пов'язано із малим часом польоту БпЛА, та обмеженою обчислювальною потужністю засобу РМ. Це призводить до зниження пошукових можливостей засобу РМ як за просторовими координатами, так і за частотою, що в умовах високої щільності ДРВ є критично важливим. Тому розроблення структури антенної системи пеленгатора

та схеми оброблення сигналу для засобу РМ на БпЛА забезпечить підвищення швидкості пошуку та локалізації ДРВ.

## 2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом теоретичним і особливо практичним питанням виявлення та визначення координат ДРВ із використанням розміщених на БпЛА засобів РМ приділяють значну увагу дослідники багатьох країн. У [1] розглянуто підхід до пеленгації ДРВ за допомогою чотирьох дипольних антен, що розміщені на БпЛА коптерного типу, із використанням псевдодоплерівського алгоритму. Також запропоновано використовувати одну антену типу хвилевий канал і обертали її навколо центру мас. Експерименти показали, що точність пеленгування визначається шириною діаграми спрямованості (ДС) антени. У [2] запропоновано метод локалізації ДРВ шляхом оброблення прийнятих сигналів на одну антену під час обертання БпЛА навколо центра мас. У [3] запропоновано обладнувати БпЛА спрямованою та неспрямованою антенами. Причому остання використовується для нормалізації вимірювань спрямованої антени. Така схема не потребує повного обертання БпЛА для визначення напрямку на ДРВ. У [4, 5] запропоновано розміщувати на БпЛА неспрямовані антени, а локалізацію ДРВ проводити за рахунок оброблення виміряних значень потужності сигналів при переміщенні БпЛА. У [6] розглянуто компроміс між розподілом часу для оброблення сигналу в конкретній точці простору і переміщенням БпЛА на іншу позицію. Проблему локалізації нерухомого ДРВ за допомогою розміщеної на БпЛА спрямованої антени шляхом оброблення прийнятого сигналу при обертанні БпЛА навколо своєї осі та планування його польоту розглянуто в [7]. Спосіб виявлення та локалізації БпЛА за сигналами їхньої телеметрії із використанням іншого БпЛА, обладнаного засобом РМ, розглянуто в [8].

Підхід до амплітудного визначення напрямку на ДРВ шляхом оптимізації статистичних алгоритмів оброблення сигналів від чотирьох антен із різною шириною ДС: двох із вузькою і двох із широкою запропоновано у [9]. Синтезований алгоритм використовує метод максимальної правдоподібності. У [10] запропоновано метод підвищення точності оцінювання напрямку на ДРВ у багатоантенній системі за рахунок оброблення сигналів від антен з вузькою та широкою ДС. У [11] розглянуто аналогічну систему, розміщену на БпЛА.

Результати аналізу розглянутих публікацій вказують на те, що невирішеними залишаються питання розроблення структури антенної системи та методів оброблення сигналу для виявлення макси-

мальної кількості ДРВ в умовах обмеженого часу польоту БпЛА.

**Метою статті** є збільшення швидкості визначення пеленгу на ДРВ із використанням розміщеного на БпЛА засобу РМ в умовах часових, масогабаритних та енергетичних обмежень за рахунок використання системи ширококугових спрямованих антен та багатоканального послідовного оброблення сигналів.

## 3 Виклад основного матеріалу

### 3.1 Структура антенної системи

У разі використання засобів РМ на БпЛА з кожного його положення теоретично можна оцінити значення двох сферичних координат – азимута і кута місця. Проте на практиці через складність реалізації антенної системи для вимірювання кута місця та малої висоти польоту БпЛА оцінюють лише азимут на ДРВ  $\theta$ . Оскільки в більшості випадків достатньо визначити координати ДРВ на площині (в припущенні, що воно розміщується на поверхні землі). Для знаходження відстані до ДРВ необхідно отримати значення пеленгів з кількох рознесених у просторі положень БпЛА.

Для оцінювання напрямку приходу радіохвилі з огляду на масогабаритні та обчислювальні обмеження розміщеного на БпЛА засобу РМ [12] доцільно реалізувати амплітудний метод пеленгування. Для цього використаємо кілька спрямованих антен і рівномірно їх розмістимо за азимутальними кутами. У разі вибору логіперіодичних антен (ЛПА), в яких ширина ДС на рівні  $-3$  дБ складає близько  $60^\circ$  незалежно від частоти, то для перекриття усіх азимутальних напрямків необхідно 6 таких антен (Рис. 1). Даний тип антен доцільно використати через їх ширококуговість. Можна також використати антени Вівальді або інший тип ширококугових антен із прийнятними масогабаритними характеристиками. Аналізуючи рівні прийнятого сигналу кожною з антен можна розрахувати напрямок приходу радіохвилі і надалі оцінити місцезнаходження ДРВ. Використання таких антен в порівнянні з неспрямованими підвищить дальність виявлення ДРВ через більший коефіцієнт підсилення ЛПА.

Якщо ДРВ буде нерухомим і орієнтація БпЛА в просторі змінюватися також не буде, то рівень прийнятого сигналу все одно буде змінюватися з часом через нерівномірність ДС антенної системи засобу РМ (Рис. 1) та ДРВ, а також переміщення БпЛА відносно ДРВ. Дані фактори будуть вносити додаткові паразитні пульсації в потужність прийнятого сигналу. Проте частота таких пульсацій буде невисокою в порівнянні зі швидкими завмираннями [13], а їхня глибина не перевищуватиме 3 дБ для сумарної ДС. Також недоліком запропонованої схеми амплітудного пеленгатора є необхідність забезпе-

ння однакових коефіцієнтів підсилення сигналу в усіх каналах. Проте в порівнянні з фазовим методом пеленгування дану вимогу виконати простіше (наприклад шляхом калібрування підсилення), ніж забезпечити синхронність роботи усіх каналів та ідентичність їхніх фазових характеристик.

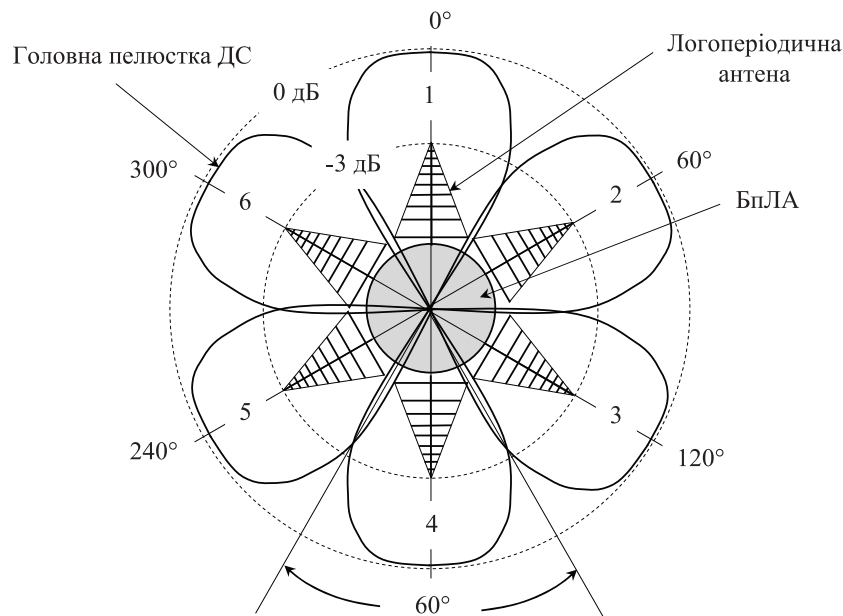


Рис. 1. Схема ширококугової антенної системи

### 3.2 Схема оброблення сигналу

Розглянемо два варіанти оброблення сигналу – паралельний, коли сигнал з кожної антени одночасно надходить на окремий приймальний пристрій, та послідовний, коли кожна антена по чергову підключається до одного приймача. Будемо вважати, що використовується скануючий приймач і в кожен момент часу приймальний пристрій аналізує сигнали в деякій смузі  $\Delta F$ . Розділити кілька ДРВ можна за частотою та пеленгом.

Для паралельної схеми оброблення прийняті на кожну антену сигнали обробляються незалежно і одночасно. Даний підхід вимагає утворення приймальних каналів за кількістю антен, що призво-

дить до збільшення ваги, габаритів та енергоспоживання засобу РМ.

Послідовний аналіз сигналів (Рис. 2) має нижчу швидкість огляду простору пропорційно кількості антен (з урахуванням додаткового часу на перемикання), але спрощує апаратну реалізацію та енергоспоживання засобу РМ. Обмеженням застосування даного підходу є те, що за час комутації всіх антен рівень сигналу не повинен значимо змінитися, оскільки для визначення напрямку на ДРВ використовується амплітудний метод. Використання даної схеми буде прийнятним у припущенні, що зміна рівня сигналу відбувається набагато повільніше, ніж здійснюється перекомутація антен на приймальний пристрій.

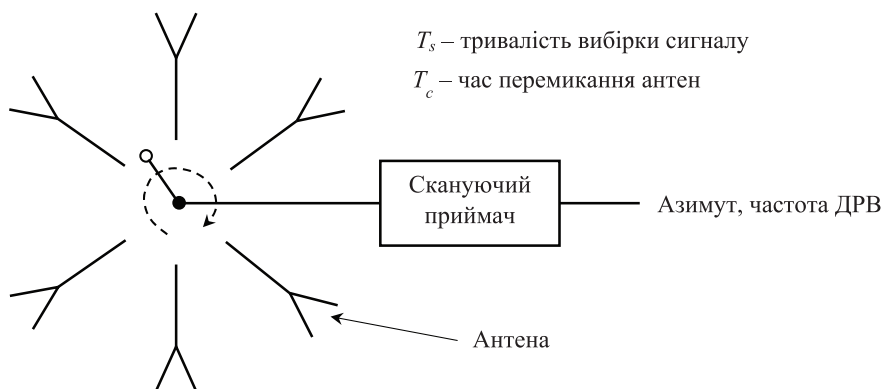


Рис. 2. Структурна схема багатоканального послідовного аналізу

В умовах масогабаритних та енергетичних обмежень доцільно реалізувати схему багатоканального послідовного аналізу сигналів. Позначимо за  $T_s$  тривалість вибірки сигналу, що аналізується із однієї антени, а за  $T_c$  – час перемикання скануючого приймача на іншу антену. Тоді тривалість циклу опитування усіх антен  $n$  в смузі частот аналізу  $\Delta F$  складатиме:

$$T_a = n(T_s + T_c). \quad (1)$$

За цей час середовище (умови поширення радіохвиль) не повинно сильно змінитися щодо дрібно-масштабних замирань, щоб не вносилися спотворення у виміряне значення потужності прийнятого сигналу. В такому разі за час аналізу смуги частот  $\Delta F$  БпЛА, що рухається зі швидкістю  $v$ , повинен переміститися на відстань, що значно менше половини довжини хвилі. За такого підходу  $T_a$  можна розрахувати відповідно до виразу:

$$T_a \ll \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{c}{20vf_0}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;  $c$  – швидкість поширення радіохвиль;  $f_0$  – несуча частота радіосигналу.

На Рис. 3 наведено залежність часу аналізу смуги частот (циклу опитування усіх антен) від несучої частоти сигналу для деяких значень швидкості польоту БпЛА. Припустимо, що швидкість БпЛА може змінюватися в межах від 50 км/год до 150 км/год (14–42 м/с). Тоді при скануванні смуги частот в межах від 600 МГц до 6 ГГц (нижня межа обрана з урахуванням прийнятих розмірів антен) мінімальний час опитування усіх антен не повинен перевищувати 60 мкс, а максимальний – 2 мс.

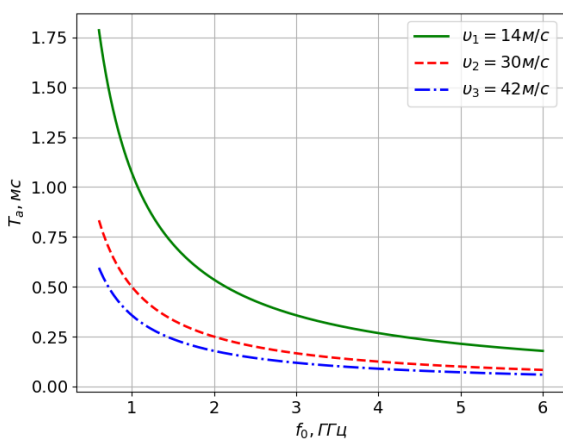


Рис. 3. Залежність часу аналізу від частоти сигналу для різних швидкостей польоту БпЛА

Крім того, протягом часу  $T_a$  потужність випромінювання ДРВ повинна залишатися незмінною. На практиці дана вимога, як правило, виконується. Проте у разі випромінювання ДРВ імпульсних сигналів при почерговому підключенні окремих антен

сигнал може не фіксуватися, що вноситиме помилки до оцінок азимуту.

Припускаємо, що тривалість польоту БпЛА  $T_F$  не залежить від його швидкості. Тоді велика швидкість польоту вимагатиме малих значень  $T_a$ . Це, в свою чергу, призведе до зниження значення відношення сигналу до шуму (ВСШ) і зменшення дальності виявлення ДРВ  $R$  та зростання помилок вимірювань потужності сигналу. Проте з іншого боку за фіксованої тривалості польоту та при максимальній швидкості БпЛА пролетить максимальний шлях. За малої швидкості польоту буде протилежний ефект – час аналізу  $T_a$  буде більшим, що приведе до зростання ВСШ і дальності виявлення ДРВ. Проте шлях польоту БпЛА буде зменшуватися.

Як бачимо, швидкість польоту БпЛА  $v$  є параметром, значення якого підлягає оптимізації. Його значення будемо шукати за критерієм максимальної кількості ДРВ, які потенційно можуть бути виявлені засобом РМ. Оскільки розміщення ДРВ апріорно невідоме, тому оптимальне значення  $v$  повинне забезпечити максимальну площу огляду для заданої дальності виявлення  $R$  та фіксованого часу польоту БпЛА. Значення даної площі наближено можна розрахувати за таким виразом:

$$S = 2RvT_F. \quad (3)$$

Дальність виявлення ДРВ  $R$  для енергетичного детектора при заданих показниках якості виявлення є функцією від ВСШ  $q$  і може бути описана із використанням рівняння Фрііса [14]. Значення ВСШ також є функцією від часу аналізу (накопичення) сигналу  $T_a$ , а саме значення  $T_a$  залежить від швидкості БпЛА для заданої частоти радіосигналу (вираз 2). Причому усі ці функціональні залежності є монотонними. Тому дальність виявлення ДРВ є функцією від швидкості БпЛА  $R = f(v)$ , вид якої залежить від обраного алгоритму виявлення.

Тоді оптимальне значення швидкості БпЛА можна знайти шляхом диференціювання виразу (3) за змінною  $v$ , прирівнювання значення похідної до нуля та розв'язування відповідного рівняння:

$$\frac{dS}{dv} = 2 \left( \frac{df(v)}{dv} v T_F + f(v) T_F \right) = 0. \quad (4)$$

Азимут на ДРВ будемо визначати шляхом порівняння амплітуд сигналів, прийнятих різними антенами, оскільки будь-яку спрямовану антену можна розглядати як просторовий фільтр [15]. Для цього необхідно отримати математичний опис ДС антени в азимутальній площині.

### 3.3 Апроксимація ДС антени

Розглянемо кілька варіантів апроксимації головної пелюстки  $n$ -ї ДС антени  $G_n(\theta)$ . На Рис. 4 наведено порівняння апроксимацій головної пелюстки ДС антени шириною  $60^\circ$  косинусоїдою, параболою, експонентою (кривою Гауса) та кардинальним синусом. Дві останні апроксимації запропоновано у [10]. Також на даному рисунку показано ДС ЛПА, що побудована за допомогою програми MMANA. З даного рисунку видно, що з урахуванням зміни рівня бічних пелюсток, ДС ЛПА доцільно описувати кривою Гауса. Для іншої антени більш прийнятним може бути інший вид апроксимації.

На Рис. 5 наведено ДС ЛПА, розрахованої на діапазон частот 800 МГц – 6 ГГц, з коефіцієнтом підсилення 10 дБ для частоти 1 ГГц та 4 ГГц, побудовані за допомогою програми MMANA.

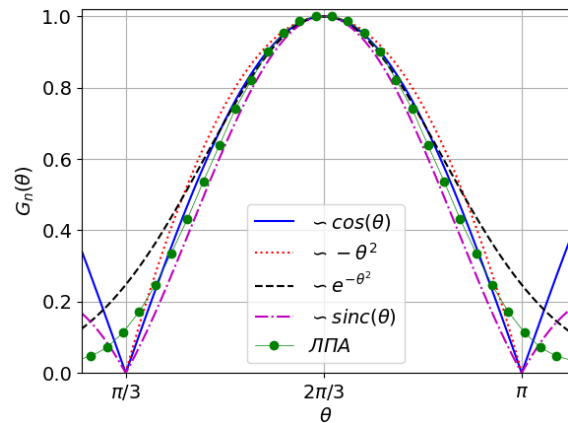


Рис. 4. Апроксимація головної пелюстки ДС антени

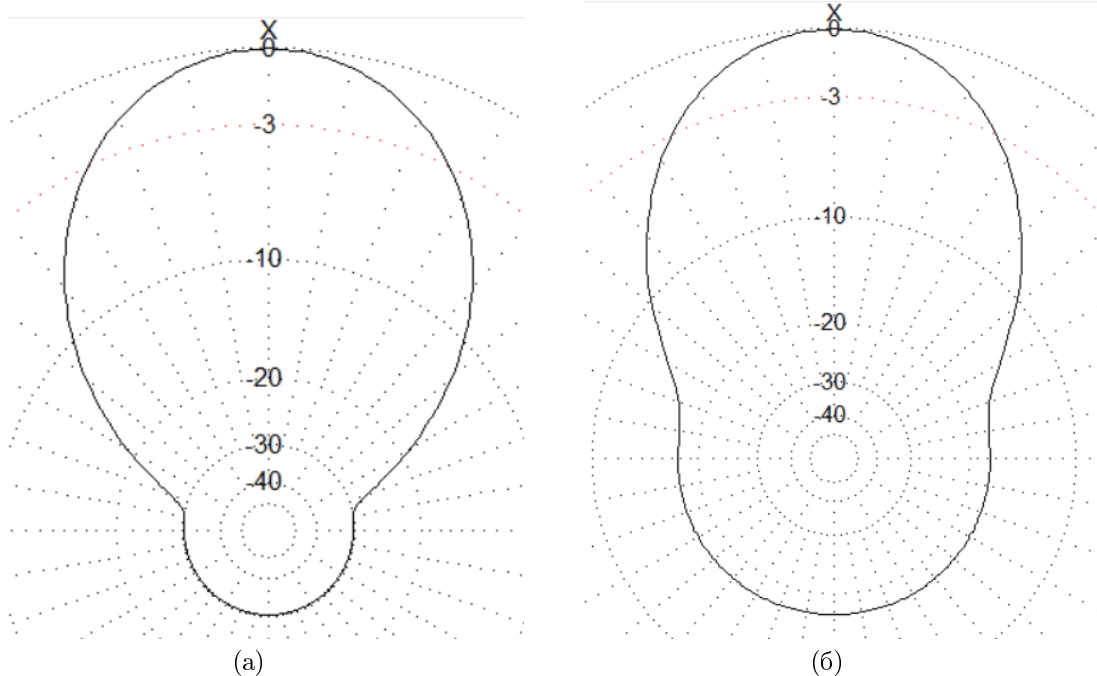


Рис. 5. ДС ЛПА з коефіцієнтом підсилення 10 дБ для частоти 1 ГГц (а) та 4 ГГц (б), побудовані за допомогою програми MMANA

Для заданого типу антен, бічні пелюстки, як правило, виражені лише задньою пелюсткою з незалежним від азимуту фіксованим рівнем. Зі збільшенням частоти радіосигналу рівень задньої пелюстки ДС зростає (Табл. 1).

Табл. 1 Залежність рівня задньої пелюстки ДС ЛПА від частоти

$f$ , ГГц	1	2	3	4	5	6
$F_{SL}$ , дБ	-30,2	-24,8	-21,6	-17,6	-13,7	-8,3

Найкраща апроксимація головної пелюстки ДС ЛПА в межах  $\pm 30^\circ$  від максимуму досягається із використанням кривої Гауса (Рис. 6). При відхиленні від максимуму більше ніж на  $75^\circ$  рівень бічних пелюсток ДС ЛПА залишається незмінним, а для кривої Гауса спадає практично до 0. На даному рисунку показана апроксимація для частоти 3 ГГц. При цьому значення параметра кривої  $b$  (формула наведена на Рис. 6) слабо залежить від частоти і його можна прийняти рівним 55. Для частоти 5 ГГц значення даного параметра складає близько 60.

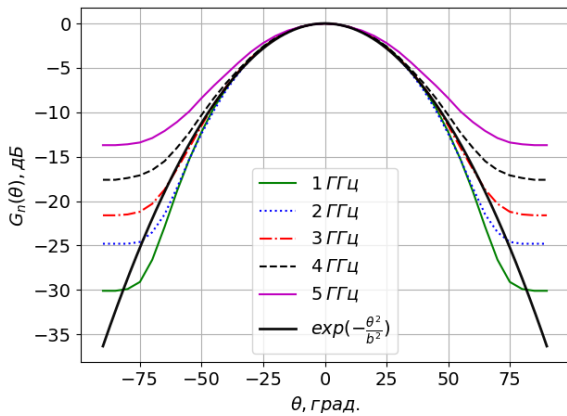


Рис. 6. Головна пелюстка ДС ЛПА для різних частот

### 3.4 Розрахунок пеленгу на ДРВ

Розглянемо випадок, коли за усіма азимутами в смузі частот аналізу присутнє випромінювання від одного ДРВ. Будемо вважати, що максимальний рівень бічних пелюсток ДС антени складає  $F_{SL}$ , а самі ДС є ідентичними та симетричними (Рис. 7).

Припускаємо, що форма та ширина ДС ЛПА  $\Delta\theta_A$  не змінюються при зміні несучої частоти сигналу в смузі її пропускання. Тоді напрямок на ДРВ  $\theta_s$  можна оцінити за такою процедурою:

1) визначити номер ДС антени  $n_0$ , що знаходиться в межах від 0 до 5, в якій амплітуда прийнятого сигналу  $A_0$  є найвищою;

2) визначити номер сусідньої ДС антени  $n_1$ , якою сигнал даного ДРВ також приймається, але з амплітудою  $A_1$ ;

3) розрахувати азимутальну поправку  $\Delta$ ;

4) якщо сусідня антена знаходиться справа, то до значення  $\Delta\theta_A$  необхідно додати поправку  $\Delta$ , а якщо зліва – то відняти:

$$\theta_s = \begin{cases} n\Delta\theta_A + \Delta, & n_1 > n_0, \\ n\Delta\theta_A - \Delta, & n_1 < n_0. \end{cases} \quad (5)$$

Азимутальну поправку  $\Delta$  будемо розраховувати шляхом порівняння амплітуд сигналів, що прийняті сусідніми антенами.

У разі апроксимації  $n$ -ї головної пелюстки ДС ЛПА функцією Гаусса відповідний математичний вираз матиме такий вигляд:

$$G_n(\theta) = \exp\left(-\frac{(\theta - n\Delta\theta_A)^2}{b^2}\right), \quad (6)$$

де значення  $\theta$  вимірюється в градусах.

Тоді амплітуду прийнятого сигналу для ДС з номером  $n_0$  можна записати у такому вигляді:

$$A_0 = G_0 A_s e^{-\frac{\Delta^2}{b^2}}, \quad (7)$$

де  $G_0$  – коефіцієнт підсилення антени;  $A_s$  – амплітуда електричного поля падаючої на антену радіохвилі.

Аналогічно амплітуду сигналу в сусідній антені можна записати у такому вигляді:

$$A_1 = G_0 A_s e^{-\frac{(\Delta\theta_A - \Delta)^2}{b^2}}. \quad (8)$$

Для визначення значення поправки  $\Delta$  із виразів (7-8) розрахуємо відношенням логарифмів амплітуд:

$$\frac{\ln(A_0)}{\ln(A_1)} = \frac{\Delta^2}{(\Delta - \Delta\theta_A)^2}. \quad (9)$$

Позначивши ліву частину виразу (9) як  $A^2$  і розв'язуючи дане рівняння відносно  $\Delta$ , отримаємо:

$$\Delta = \Delta\theta_A \frac{A}{A - 1}. \quad (10)$$

Підстановка розрахованого значення у вираз (5) дозволить розрахувати значення пеленгу на ДРВ.

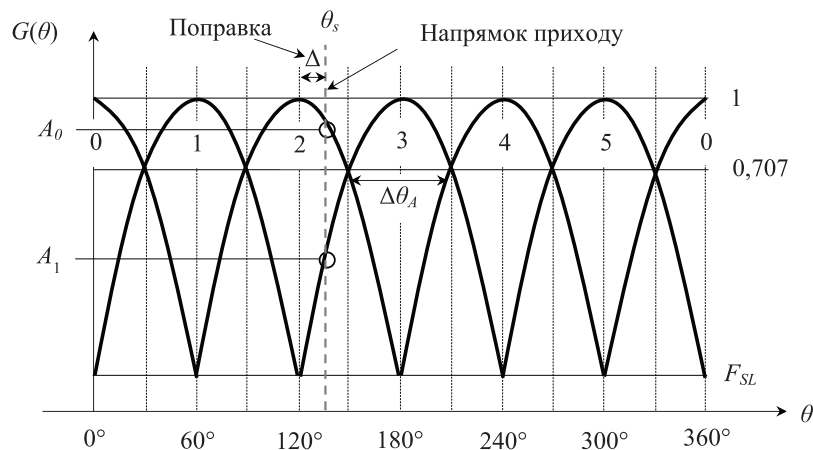


Рис. 7. Парціальні ДС антенної системи

На практиці ЛПА мають ненульовий рівень бічних пелюсток, тому для запропонованої антенної системи (Рис. 1) сигнал від одного ДРВ може реєструватися більше ніж двома антенами, створюючи неоднозначність кількості ДРВ. Це виникатиме у випадках потужного сигналу, що приймається бічною пелюсткою ДС, або слабкого сигналу, який проходить через максимум ДС. У такому разі рівні прийнятого сигналу різними каналами можуть виявитися практично однаковими і розділити їх можна буде шляхом логічного оброблення усіх отриманих пеленгів. Розраховані як за основним, так і за бічними пелюстками ДС пеленги на однакові ДРВ будуть практично співпадати, що створюватиме відмітки хибних ДРВ.

Потужність прийнятого  $n$ -ю антеною сигналу в смузі частот аналізу приймача складається із потужностей сигналів  $M$  ДРВ, зважених формою ДС даної антени, і може бути записана у такому вигляді:

$$P_n = \sum_{i=1}^M P_i G_n^2(\theta_{si}), \quad (11)$$

де  $P_i$  – потужність  $i$ -го ДРВ в точці приймання;  $\theta_{si}$  – азимут  $i$ -го ДРВ.

Тому на практиці за умови невідомих значень  $P_i$  розділити кілька ДРВ в одній смузі частот (одночасно оцінити значення  $M$  та  $\theta_{si}$ ) однозначно неможливо, оскільки в кожен момент часу ми отримуємо лише значення сумарної потужності сигналів з кожного каналу антенної системи. Усунути до деякої міри дану неоднозначність можна шляхом звуження миттєвої смуги пропускання скануючого приймача, що підвищить ймовірність розділення ДРВ за частотою. Проте це призведе до збільшення часу на огляд усієї смуги аналізу.

## Висновки

У роботі запропоновано амплітудний пеленгатор ДРВ для БпЛА, що дозволить підвищити швидкість пошуку ДРВ в умовах часових, масогабаритних та енергетичних обмежень за рахунок використання системи широкопasmових спрямованих антен та багатоканального послідовного оброблення сигналів. У порівнянні з існуючими рішеннями, коли використовується один приймальний канал з однією спрямованою антеною, а сканування простору здійснюється шляхом обертання БпЛА, запропонований підхід із багатоантенною системою забезпечить на порядок і більше скорочення часу на огляд азимутальних напрямків. Запропоновано підхід до оптимізації швидкості польоту БпЛА.

Перспективи подальших досліджень в даному напрямку полягають у визначенні оптимальних значень швидкості польоту БпЛА для енергетичного детектора при різних значеннях об'єму вибірки сигналу.

## References

- [1] VonEhr K., Hilaski S., Dunne B. E., Ward J. (2016). Software Defined Radio for direction-finding in UAV wildlife tracking. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, pp. 464-469. doi: 10.1109/EIT.2016.7535285.
- [2] Chen F., Rezaatofighi S. H., Ranasinghe D. C. (2024). GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources. *Computer Science. Robotics*, 9 p. doi: 10.48550/arXiv.2410.13081.
- [3] Dressel L., Kochenderfer M. J. (2018). Pseudo-bearing Measurements for Improved Localization of Radio Sources with Multicopter UAVs. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 6560-6565. doi: 10.1109/ICRA.2018.8460734.
- [4] Isaacs J. T., Quitin F., Carrillo G. L. R., Madhow U., Hespanha J. P. (2014). Quadrotor control for RF source localization and tracking. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, pp. 244-252. doi: 10.1109/ICUAS.2014.6842262.
- [5] Hasanzade M., Herekoğlu Ö., Yeniçeri R., Koyuncu E., İnalhan G. (2018). RF Source Localization using Unmanned Aerial Vehicle with Particle Filter. *9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, pp. 284-289. doi: 10.1109/ICMAE.2018.8467555.
- [6] Hoffmann F., Schily H., Charlish A., Ritchie M., Griffiths H. (2019). A Rollout Based Path Planner for Emitter Localization. *22th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011368.
- [7] Hoffmann F., Schily H., Krestel M., Charlish A., Ritchie M., Griffiths H. (2023). Non-myopic Sensor Path Planning for Emitter Localization with a UAV. *26th International Conference on Information Fusion*, 8 p. doi: 10.23919/FUSION52260.2023.10224174.
- [8] Dressel L., Kochenderfer M. J. (2019). Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target. *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1905-1912. doi: 10.1109/ICRA.2019.8794243.
- [9] Tserne E., Popov A., Kovalchuk D., Sereda O., Pidlisnyi O. (2023). Four-antenna amplitude direction finder: statistical synthesis and experimental research of signal processing algorithm. *Radioelectronic and computer systems*, Vol. 108, Iss. 4, pp. 88-99. doi: 10.32620/reks.2023.4.08.
- [10] Zhyla S. et al. (2024). Statistical Synthesis and Analysis of Functionally Deterministic Signal Processing Techniques for Multi-Antenna Direction Finder Operation. *Computational*, Vol. 12, Iss. 9, 170. doi: 10.3390/computation12090170.
- [11] Zhyla S., Popov A., Tserne E., Cherepnin G., Kovalchuk D., Inkarbaieva O. (2023). UAV-born Narrowband Radar Complex for Direction Finding of Radio Sources. *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, pp. 1-6. doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416434.
- [12] Kwon H., Guvenc I. (2023). RF Signal Source Search and Localization Using an Autonomous UAV with Predefined Waypoints. *IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200783.
- [13] Goldsmith A. (2020). *Wireless Communications*. 2nd ed. Stanford University, 597 p.

- [14] Lathi B. P., Ding Z. (2019). *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 5th ed. Oxford University Press, 1025 p.
- [15] Ardoino R. and Marcantoni D. Passive Direction Finding Techniques – Amplitude Comparison. *EMSOPEDIA website*, view data: feb. 2025.

## Amplitude Direction Finder of Radio Frequency Emitters for Unmanned Aerial Vehicle

*Buhaiov M. V.*

The detection and localization of low-power radio frequency emitters (RFE) in populated areas using stationary spectrum sensing (SS) equipment is ineffective due to the lack of line of sight in shadowing effect. To solve this problem, it is advisable to place the SS equipment on a small unmanned aerial vehicle (UAV). The limitations of this solution are low time for data collection and processing and the low computing power of SS device. This leads to a decrease in search capabilities of SS both in terms of spatial coordinates and frequency, which is critical in conditions of high density of RFE. The aim of this article is to increase the speed of RFE searching using a UAV-mounted SS device under time, weight, and energy constraints by using a system of broadband directional

antennas and multichannel sequential signal processing. The amplitude direction finding method was chosen to estimate the direction of radio wave arrival, taking into account the mass and computational limitations of the SS device placed on the UAV. The proposed structure of the antenna system contains six log-periodic antennas spaced in a circle by  $60^\circ$ . To process the received signal, a multichannel sequential analysis scheme is proposed, in which one scanning receiver is alternately connected to each of the antennas. It is shown that for this scheme, the parameter to be optimized is the flight speed of the UAV. A generalized expression for calculating this value is obtained. An expression for approximating the main lobe of the antenna radiation pattern in form of a Gaussian function is obtained. A procedure for calculating the direction on RFE by comparing the amplitudes of the received signals by two neighboring antennas is developed. Recommendations to avoid ambiguities in calculation angle of arrival for the case of several RFE are given. Compared to existing solutions, when a single receiving channel with a single directional antenna is used and space scanning is performed by rotating the UAV, the proposed approach with a multi-antenna system will reduce the time for azimuthal directions scanning.

*Keywords:* amplitude direction finder; radio frequency emitters; unmanned aerial vehicle; spectrum sensing; scanning receiver