

## СПОСІБ ОДНОПОЗИЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ РАДІОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

В даний час все більше актуальною стає завдання визначення місцезнаходження джерел радіовипромінювань зі складними видами модуляції, широкою смугою випромінювання і низькою потужністю. Необхідність створення систем радіомоніторингу та місцезнаходження джерел радіовипромінювань виникає як у військових (контроль прикордонних територій, зон локальних конфліктів), так і у цивільних споживачів (моніторинг судноплавства на міжнародних транспортних коридорах і в особливих економічних зонах, пошук джерел перешкод в телекомунікаційних системах, виявлення несанкціонованого доступу в системи зв'язку).

**Ключові слова:** пеленгація, пасивна локація, джерело радіовипромінювання, визначення місця розташування, триангуляція

### Вступ

Ведення бойових дій в даний час визначається все більшою залежністю від інформаційно-керуючої компоненти, вплив якої, в першу чергу, зростає в силу концептуальних особливостей побудови системи управління, спираються на мережний принцип, який передбачає формування єдиного інформаційного простору з ієрархічно розподіленим доступом. Одним з істотних елементів цього простору, що визначає особливості застосування, в тому числі, основних систем озброєння, є інформація про протиборче угруповання військ, що включає в себе, крім іншого, дані про просторове розміщення випромінюючих радіоелектронних засобів (РЕЗ). Беручи до уваги що застосовуються в даний час в існуючих і перспективних зразках засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби способи пеленгування і координатометрії можна прийти до висновку, що рішення цих завдань передбачає просторове рознесення елементів системи визначення місцезнаходження. Подібні умови істотно підвищують вразливість системи за напрямками реалізації функцій інформаційного обміну і синхронізації.

Разом з тим, в даний час простежується стійка тенденція, яка характеризується значним збільшенням точних показників апаратури, що дозволяє проводити вимірювання параметрів електромагнітних хвильових процесів, що відкриває можливості в межах невеликих, в порівнянні з довжиною хвилі, областей простору, проводити оцінку зміни, наприклад, їх фази. Дані обставини дозволяють зняти ряд обмежень при реалізації способів фазової пеленгації і тим самим розширити їх функціональність.

Сказане вище визначає мету цієї роботи, яка полягає у формуванні способу фазової координатометрії, яка передбачає можливість вимірювання кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі, з подальшим визначенням координат джерела радіовипромінювання.

### Постановка задачі

Підвищення точності визначення координат джерела радіовипромінювання є актуальним завданням. Для визначення координат джерела радіовипромінювання використовуються різні методи позиціонування. Недоліком існуючих методів визначення координат ДР є значний вплив геометричного розподілу пунктів прийому на точність визначення координат ДР. Помилка визначення координат ДР залежить від точності визначення часових затримок приходу сигналу на ПП, які використовуються для розрахунку ліній положення.

### Спосіб визначення координат джерела радіовипромінювання

Розглянемо лінійну еквідистантну антенну решітку, елементи якої, з точки зору розглянутої задачі, можна розглянути як просторово рознесені вимірювачі відносно фазової затримки, розташовані в точках з координатами  $\{x_i, y_i\}$ , де  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$ -кількість елементів решітки.

Результати, отримані при оцінці величини відносно фазової затримки, визначимо у вигляді велечини:

$$\{\Delta\varphi_{ij}\}, i=1, N, i \neq j$$

де  $j$ -номер опорного вібратора антенної решітки.

Беручи до уваги, що геометричне місце точок перетину еквіфазної поверхні джерела електромагнітного випромінювання, в припущенні її сферичності і площини, в якій лежать джерело випромінювання і антенна решітка, являє собою окружність, можна стверджувати, що величини різниць фаз вираження (1) визначають різницю ходу хвиль,

$$\{\Delta d_{ij}\} = \lambda / 2\pi \cdot \{\Delta\varphi_{ij}\}, i=1, N, i \neq j$$

які, в свою чергу, характеризують величини відрізків, відновлених з точок розташування вимірювачів (елементів решітки) до «сліду» фронту хвилі джерела (див. рис.1).

Припустимо координати точок  $\{(x_{0i}, y_{0i})\}$ , що визначають просторове положення фронту хвилі на відповідній площині, є відомими.

Відповідно до чого, в детермінованій постановці завдання визначення координат джерела випромінювання фактично зводиться до визначенню геометричних параметрів окружності по відомим координатам її точок.

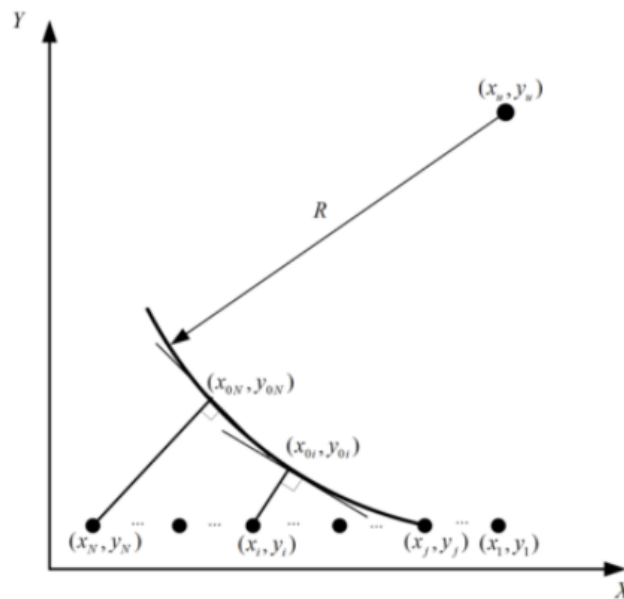


Рис. 1. Геометрія задачі визначення місцезнаходження

Рівняння кола, як кривої другого порядку, запишемо у вигляді, представленому наступним співвідношенням:

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0, a = 1, b = 0, c = 1.$$

Тобто для отримання рівняння окружності необхідно визначити величини параметрів  $d, e, f$ , які, в свою чергу, дозволять розрахувати координати її центру і радіус, виходячи з виразів:

$$x_u = -d, y_u = -e, r = \sqrt{d^2 + e^2 - f}$$

Цілком логічно припустити, що для вирішення даного завдання досить координат трьох точок кола. Подібні умови дозволяють сформулювати систему лінійних рівнянь в наступному вигляді:

$$x_{0k}^2 + y_{0k}^2 + 2dx_{0k} + 2ey_{0k} + f = 0, k = \overline{1,3}$$

Таким чином, рішення системи (5) дає можливість, скориставшись результатами вимірювання різниці ходу хвиль в трьох точках, розташованих в одній області просторової локалізації, визначити координати джерела випромінювання.

#### Моделювання процесу визначення місцезнаходження

В інтересах оцінки впливу точності встановлення координат «сліду» фазового фронту, а так само як і визначення відносної фазової затримки між відповідними вимірювачами, на значення показників, що характеризують якість виконання завдання визначення місцезнаходження джерела випромінювання, виникає необхідність проведення обчислювального експерименту, в основу якого буде покладено добре зарекомендував себе при вирішенні подібних завдань метод статистичних випробувань - метод Монте-Карло [3].

Як показник, що характеризує точність визначення координат, розглянемо величину лінійної помилки  $\Delta_r$ , яка визначається як відстань між точками з розрахованим  $(\widehat{x}_u, \widehat{y}_u)$  і істинним  $(x_u, y_u)$  місцеположенням джерела випромінювання:

$$\Delta_r = \sqrt{(\widehat{x}_u - x_u)^2 + (\widehat{y}_u - y_u)^2}$$

При формуванні елементів структури обчислювального алгоритму оцінки лінійної помилки координатометрії визначимо обмеження на вид закону розподілу координат фазового фронту, який залежить від розподілу величини вимірюваного відносного фазового набігу. З урахуванням того, що останні пов'язані лінійним перетворенням, а закон розподілу вимірюваних значень фази можна вважати близьким до нормального [3,4], то координати фазового фронту також будуть розподілені по нормальним законом [5].

Завдання координатометрії об'єкта на площині або в просторі зводиться до вимірювання геометричних величин, однозначно характеризують його положення щодо заданої системи координат. В теорії систем під способом розуміється практична реалізація методу. В даний час для визначення координат об'єктів використовуються різні способи координатометрії класифікація яких наведена на (рис.2).



Рис 2. Способи координатометрії

З урахуванням сказаного вище, а також беручи до уваги вираження (4), (5), структуру обчислювального алгоритму розрахунку величини лінійної помилки визначення місцезнаходження визначимо у вигляді, представленому на рис. 3.

Для проведення обчислювального експерименту сформуємо безліч вихідних даних в наступному вигляді: видалення джерела випромінювання від області просторової локалізації вимірників фази, що відраховується від точки з координатами  $(x_i, y_i)$  становить 1 км, довжина хвилі джерела  $\lambda = 1\text{ м}$ , довжина решітки  $D = 1\text{ м}$ , кількість елементів - 3.

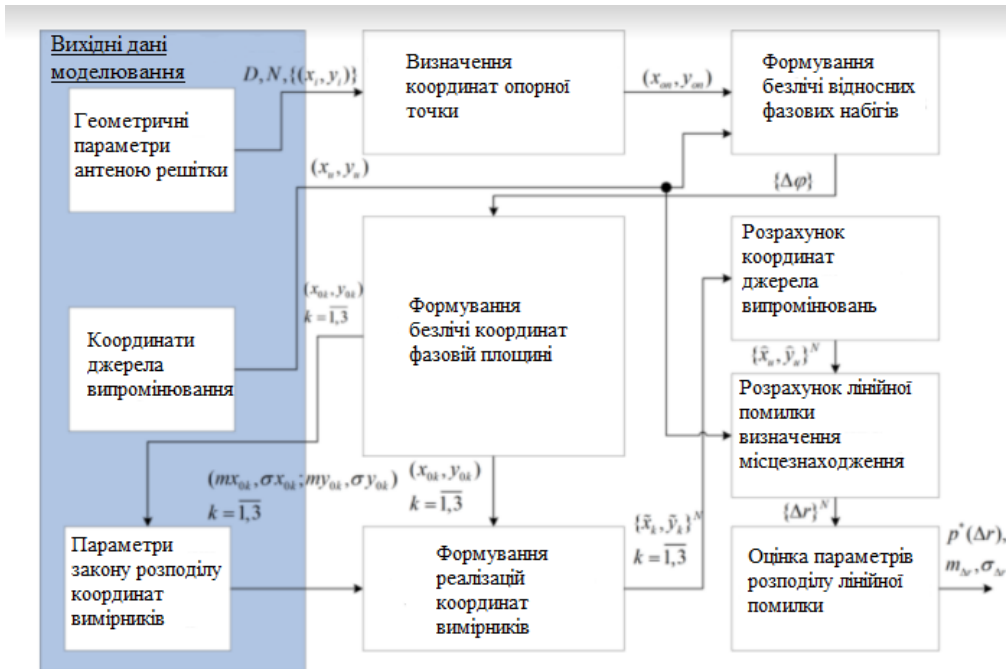


Рис. 3. Структура обчислювального алгоритму оцінки лінійної помилки визначення місцезнаходження

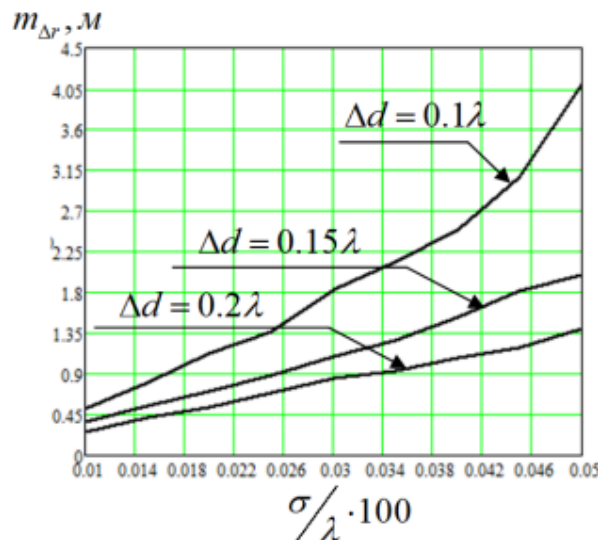


Рис. 3. Графіки залежності лінійної помилки визначення місцезнаходження від ступеня невизначеності просторового положення однієї з точок фазової площині

**Аналіз результатів обчислювального експерименту**

Аналіз залежностей, представлених на малюнку 3, показує, що збільшення ступеня невизначеності просторового положення однієї з точок фазового фронту, зокрема, стосовно

обчислювального експерименту - середньої з них, призводить до істотного зростання величини середнього значення лінійної помилки визначення місця знаходження. При цьому, для малого по відношенню до довжини хвилі середнє відхилення координат, вид залежно близький до лінійного (в діапазоні від  $10^{-4}\lambda$  до порядку  $0,42 \cdot 10^{-4}\lambda$ ), а при  $\sigma > 0,42 \cdot 10^{-4}\lambda$  залежність яку ми розглядаємо стає нелінійною.

Слід зазначити, що подальше збільшення  $\sigma$  призводить до лавиноподібного зростання помилки, що фактично характеризує неможливість визначення координат і встановлює допустимий поріг по невизначеності в оцінці просторового положення фазового фронту, тобто фактично - вимоги до точності вимірювання відносної фазової затримки.

Крім цього, на точність оцінки координат впливає відстань між вимірювачами. Так, згідно з наведених залежностей остання зростає при збільшенні цього параметра, що пояснюється, як зменшенням відносного значення середньоквадратичної помилки визначення координат вимірювача фази, так і ступенем чутливості до кривизни фазового фронту хвилі джерела в області розташування вимірювачів.

### Висновок

Таким чином, в даній роботі розглянуто спосіб визначення координат джерела випромінювання, заснований на вимірюванні кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в мінімум трьох просторово рознесених на відстань точках. В інтересах оцінки точності визначення координат запропонованим способом на основі обчислювального алгоритму, розробленого із застосуванням методу Монет-Карло, була розроблена його імітаційна модель. Результати моделювання підтверджують спроможність запропонованого способу і дозволяють сформулювати вимоги до точності вимірювання відносної фазової затримки при заданих значеннях показників, що характеризують точність визначення координат, і оціночних даних про область невизначеності, що характеризує відносне просторове розміщення випромінює радіоелектронного засобу.

### Перелік посилань

1. Авиационные системы радиоперехвата / В. И. Меркулов, В. С. Чернов, В. А. Гандурин и др. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2008. 424 с.
2. Быстров Р. П. Пассивная радиолокация. Методы обнаружения объектов. М.: Радиотехника, 2008. 318 с.
3. [http://8ref.com/15/referat\\_159500.html](http://8ref.com/15/referat_159500.html) - Радіохвильові і радіопроменеві засоби виявлення - Комунікації і зв'язок.
4. Бызов А. Н., Петров Ю. В. Определение местоположения источника радиоизлучения пассивными средствами летательного аппарата // Вопросы радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 47-56.
5. Електронний ресурс <https://uk.wikipedia.org/> - Пасивна радіолокація.
6. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоположения источников излучения. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
7. Петров Ю. В. Определение местоположения излучающих целей в пассивных однопозиционных радиолокационных системах // Известия РАН. 2016. № 3. С. 155-158.
8. Рудинский А. В., Шенгелия М. В. О возможности однопозиционного определения дистанции до объекта в пассивном режиме работы радиотелескопа // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. С. 648-650.
9. <https://ualeks.com/solutions/national-security> - національна безпека.
10. Белик Б. В., Сузанский Д. Н., Чернов В. С. Способы оценивания дальности до подвижного источника радиоизлучения на основе угломерных данных на борту летательного аппарата // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 3. С. 19-25.
11. Мельников Ю. П., Попов С. В. Возможности кинематического определения дальности до источника радиоизлучения движущимся наблюдателем // Радиотехника. 2006. № 9. С. 17-21.

Надійшла: 30.10.2020

Рецензент: д.т.н., професор Гайдур Г.І.