

УДК 621:533

В.І. Чигінь

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

## МЕЖІ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТИ СНАРЯДА-МАЯКА І ГЕОМЕТРІЯ АНТЕН ПАСИВНОЇ РІЗНИЦЕВО-ФАЗОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Теоретично визначено межі вимірювання координати снаряда-маяка за допомогою пасивної різницево-фазової радіолокаційної системи. Встановлено аналітичні залежності між різницями фаз радіохвилі, яка приходить від радіомаяка до двох і трьох рознесених антен, і відстанями маяк-антена та антена-антена. Ці залежності досліджувались для випадків розміщення антен на прямій, перпендикулярній до напрямку руху маяка. Показано, що використання радіомаяка з частотою випромінювання 433 МГц і фазометра на основі мікросхеми AD8302 дозволяє, при віддалі між двома антенами рівній довжині півхвилі або довжині хвилі 0,693 м, вимірювати віддаль маяк-антена в межах 30-120 м, а при збільшенні віддалі між антенами до 3-5 довжин хвилі можливе вимірювання віддалі в межах 1000-3000 м. Наявність трьох антен дозволяє використовувати одну пару антен для вимірювання малих віддалей, а другу пару – великих віддалей.

**Ключові слова:** пасивна радіолокація, різницево-фазова система, радіомаяк, антени, область вимірювань.

### Вступ

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** При сучасних вимогах до швидкодії і точності проведення артилерійської стрільби актуальною є задача вимірювання координат снарядів з використанням пасивної радіолокації [1,2]. У працях [1,2] запропоновано використовувати снаряд-маяк для пасивного вимірювання його відхилення від заданої траєкторії польоту. В роботі [3] опрацьована схема використання фазометра на основі мікросхеми AD8302 для вимірювання різниць фаз радіохвилі, яка приходить від снаряда-маяка до рознесених антен, і методику визначення його координат в залежності від виміряних різниць фаз. У зв'язку з тим, що існуючі фазометри мають обмеження щодо області вимірювання різниці фаз [3], то у цій роботі теоретично визначено, в яких межах можливе вимірювання координат снаряда-маяка за допомогою наявного фазометра.

**Метою праці** є теоретичне обґрунтування розташування на одній прямій двох і трьох приймальних антен пасивної різницево-фазової радіолокаційної системи для визначення координати снаряда-маяка, який переміщується прямо-лінійно перпендикулярно до прямої, на якій розміщені антени.

### Основна частина

**1. Визначення допустимих меж вимірювання координати снаряда-маяка з використанням двох антен.** Для спрощення задачі розглянули

визначення координати снаряда-маяка, який рухається по осі діаграми спрямованості однієї з антен (рис. 1). На рис. 1 зображено дві приймальні антени  $A_1$  і  $A_2$ , які

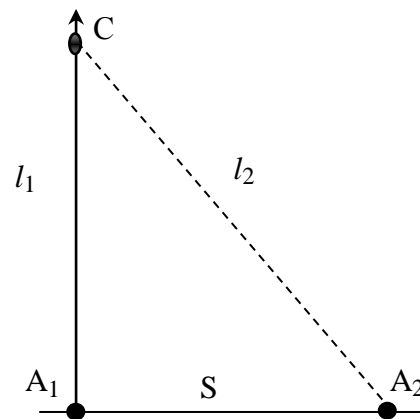


Рис. 1. Схема визначення координати радіомаяка при використанні двох антен

розміщені на прямій, перпендикулярній до напрямку переміщення снаряда-маяка C. Віддаль від антени  $A_1$  до радіомаяка C позначено  $l_1$ , від радіомаяка до антени  $A_2$  -  $l_2$ , а віддаль між антенами -  $S$ .

Прийняті антенами радіосигнали подаються до фазового детектора, який визначає різницю фаз  $\Delta\varphi$ . Знаючи різницю фаз, довжину радіохвилі  $\lambda$  і віддаль між антенами  $S$ , отримуємо залежність між цими параметрами

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda \left( \sqrt{S^2 + l_1^2} - l_1 \right)}. \quad (1)$$

### 1.1. Залежність для допустимої нижньої межі вимірювання

Враховуючи, що фазометр на основі мікросхеми AD8302 може вимірювати різницю фаз в області  $1^\circ-180^\circ$ , розглянули задачу однозначного визначення меж віддалей від снаряда-маяка до антен, в яких їх можна вимірювати цим фазометром. Оскільки метод вимірювання віддалей від антен до снаряда-маяка побудовано на використанні різниці фаз  $\Delta\varphi$ , то для їх однозначного визначення необхідно, щоб різниця фаз не перевищувала  $180^\circ$

$$\Delta\varphi \leq 180^\circ, \quad (2)$$

Тоді, враховуючи довжину радіохвилі  $\lambda$ , необхідно, щоб різниця між віддальми від джерела сигналу до антен задовольняла нерівність

$$l_2 - l_1 > 0.5\lambda, \quad (3)$$

Оскільки

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 + S^2}, \quad (4)$$

то нерівність (3) приймає вигляд

$$\sqrt{l_1^2 + S^2} - l_1 < 0.5\lambda. \quad (5)$$

Розв'язуючи цю нерівність, отримуємо

$$\begin{aligned} l_1^2 + S^2 < l_1^2 + l_1\lambda + 0.25\lambda^2, \\ l_1\lambda > S^2 - 0.25\lambda^2 \end{aligned}$$

або

$$l_1 > \frac{S^2 - 0.25\lambda^2}{\lambda}. \quad (6)$$

Отже, для *однозначного* визначення віддалі від снаряда-маяка до антени необхідно, щоб він розташовувався на віддалі, яка задовольняє нерівність (6). В іншому випадку фазометр не розпізнає однозначно різниці фаз – вона повторюється кратно  $180$  градусам.

У випадку  $S^2 - 0.25\lambda^2 < 0$  або  $S < 0.5\lambda$  обмеження на визначення нижньої межі вимірювання віддалі  $l_1$  відсутнє.

### 1.2. Залежність для допустимої верхньої межі вимірювання

Враховуючи, що при отриманні радіохвилі двома антенами від снаряда-маяка, який перебуває на *великій* віддалі, різниця фаз між цими хвилями є незначною і фіксування цієї різниці фаз

обмежується чутливістю фазометра, необхідно визначити, до якої максимальної віддалі конкретний фазовий прилад дозволяє її визначати.

Для цього необхідно розв'язати нерівність:

$$l_2 - l_1 > \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}, \quad (7)$$

де  $\Delta\varphi_{кр}$  – мінімальна різниця фаз, яку може зареєструвати різницево-фазовий детектор. Враховуючи (4), нерівність (7) набирає вигляду

$$\sqrt{l_1^2 + S^2} - l_1 > \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}, \quad (8)$$

Розв'язуючи нерівність (8)

$$\begin{aligned} l_1^2 + S^2 > l_1^2 + \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_2}{180} + \frac{\Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{360^2}, \\ \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_2}{180} < S^2 - \frac{\Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{360^2}, \end{aligned}$$

отримуємо

$$l_1 < \frac{S^2 - \frac{\Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{360^2}}{\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{180}},$$

або

$$l_1 < \frac{360^2 S^2 - \Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{720\Delta\varphi_{кр}\lambda}. \quad (9)$$

Отже, якщо снаряд-маяк знаходиться на віддалі більшій від значення  $\frac{360^2 S^2 - \Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{720\Delta\varphi_{кр}\lambda}$ , то різницево-фазовий детектор не буде здатний зафіксувати різницю фаз.

### 1.3. Кінцевий вираз для допустимих меж вимірювання фазометром

Отже, однозначне вимірювання віддалі  $l_1$  від снаряда-маяка до антени  $A_1$  за допомогою різницево-фазового детектора при використанні двох антен є можливим, якщо вона задовольняє нерівність

$$\frac{S^2 - 0.25\lambda^2}{\lambda} < l_1 < \frac{360^2 S^2 - \Delta\varphi_{кр}^2\lambda^2}{720\Delta\varphi_{кр}\lambda}. \quad (10)$$

### 1.4. Вираз для обчислення віддалі від снаряда-маяка до антени

Якщо виміряна різниця фаз дорівнює  $\Delta\varphi$ , то

$$l_2 = l_1 + \frac{\Delta\varphi\lambda}{360}. \quad (11)$$

Враховуючи співвідношення (4), отримуємо

$$\left(l_1 + \frac{\Delta\varphi\lambda}{360}\right)^2 = l_1^2 + S^2. \quad (12)$$

Розв'язуючи рівняння (12) відносно  $l_1$ , отримуємо

$$l_1 = \frac{180S^2}{\Delta\varphi\lambda} - \frac{\Delta\varphi\lambda}{720}. \quad (13)$$

Залежність (13) дає можливість визначити віддаль від снаряда-маяка до антени  $A_1$ , якщо відомі:  $\lambda$  – довжина радіохвилі,  $S$  – віддаль між антенами,  $\Delta\varphi$  – виміряна різниця фаз. Приклад визначення віддалі:  $\lambda = 0,693$  м,  $S = 2\lambda$ ,  $\Delta\varphi = 2^\circ$ , тоді  $l_1 = 249,5$  м.

## 2. Визначення допустимих меж вимірювання координати снаряда-маяка з використанням трьох антен

Для вимірювання віддалей до снаряда-маяка в широкому діапазоні значень пропонується пасивна радіолокаційна система з трьома рознесеними приймальними антенами (рис. 2). При цьому одна пара антен  $A_1A_2$  використовується для вимірювання близьких віддалей до снаряда-маяка, а друга пара –  $A_1A_3$  – далеких віддалей.

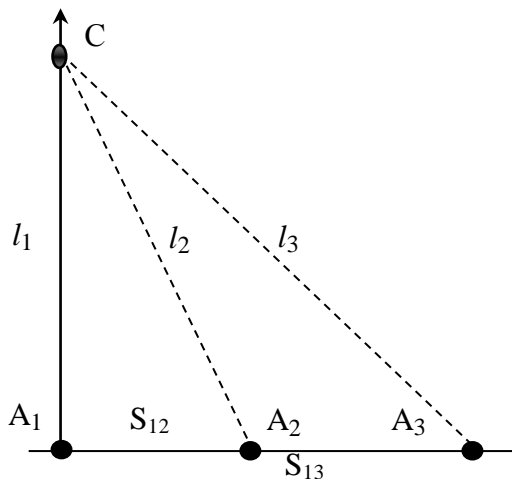


Рис. 2. Схема визначення координати снаряда-маяка за допомогою трьох антен

$S_{12}$  – віддаль між антенами  $A_1$  і  $A_2$ ,  $S_{13}$  – віддаль між антенами  $A_1$  і  $A_3$ .  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – віддалі від снаряда-маяка до антен  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$ , відповідно.

### 2.1. Визначення допустимої нижньої межі вимірювання віддалі першою парою антен

Враховуючи вибрану величину  $S_{12}$ , визначаємо, до якого мінімального значення можна однозначно вимірювати віддаль  $l_1$ . Для цього записуємо нерівність

$$l_2 - l_1 \leq \frac{180\lambda}{360}. \quad (14)$$

Враховуючи, що  $l_2^2 = l_1^2 + S_{12}^2$ , нерівність (14) набирає вигляду

$$\sqrt{l_1^2 + S_{12}^2} - l_1 \leq \frac{180\lambda}{360}.$$

Розв'язуючи цю нерівність, отримуємо обмеження для віддалі  $l_1$ :

$$\begin{aligned} l_1^2 + S_{12}^2 &\leq l_1^2 + l_1\lambda + 0.25\lambda^2, \\ S_{12}^2 &\leq l_1\lambda + 0.25\lambda^2, \\ l_1 &\geq \frac{S_{12}^2}{\lambda} - 0.25\lambda_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Отже, за допомогою першої пари антен можна однозначно вимірювати віддаль між снарядом-маяком і антеною  $A_1$ , якщо виконується нерівність (15).

### 2.2. Залежність для допустимої верхньої межі вимірювання першою парою антен

Оскільки фазометр характеризується нижньою межею чутливості  $\Delta\varphi_{кр}$ , то це накладає обмеження на віддаль, до якої можна вимірювати координату  $l_1$  снаряда-маяка за допомогою пари антен  $A_1$  і  $A_2$ . Для знаходження цієї віддалі необхідно розв'язати нерівність

$$l_2 - l_1 \geq \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}. \quad (16)$$

Враховуючи, що  $l_2^2 = l_1^2 + S_{12}^2$ , та розв'язуючи нерівність (16), отримуємо

$$\begin{aligned} l_1^2 + S_{12}^2 &\geq l_1^2 + \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_1}{180} + \left(\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}\right)^2; \\ S_{12}^2 &\geq \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_1}{180} + \left(\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}\right)^2 \\ l_1 &\leq \frac{S_{12}^2 - \left(\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}\right)^2}{\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{180}} = \frac{360^2 S_{12}^2 - \Delta\varphi_{кр}^2 \lambda^2}{720 \Delta\varphi_{кр} \lambda}; \\ l_1 &\leq \frac{180 S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр} \lambda} - \frac{\Delta\varphi_{кр} \lambda}{720}. \end{aligned} \quad (17)$$

Враховуючи чутливість фазометра  $\Delta\varphi_{кр}$ , за допомогою пари антен  $A_1$  і  $A_2$  можна визначати віддаль від снаряда-маяка до антени  $A_1$ , якщо виконується нерівність (17).

Отже, першою парою антен можна вимірювати віддаль  $l_1$  до снаряда-маяка в межах

$$\frac{S_{12}^2}{\lambda} - 0.25\lambda_0 \leq l_1 \leq \frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}\lambda} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{720}.$$

### 2.3. Залежність для максимальної віддалі між антенами другої пари

Оскільки за допомогою другої пари антен  $A_1A_3$  передбачається вимірювати віддаль  $l_1$  до снаряда-маяка, більшої від верхньої межі вимірювання за допомогою першої пари антен, тобто

$$l_1 = \frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}\lambda} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{720}, \quad (18)$$

то віддаль  $S_{13}$  між антенами  $A_1$  і  $A_3$  необхідно визначити з нерівності

$$l_3 - l_1 \leq \frac{180\lambda}{360}.$$

Розв'язуючи цю нерівність з врахуванням, що  $l_3^2 = l_1^2 + S_{13}^2$ , отримуємо

$$\begin{aligned} \sqrt{l_1^2 + S_{13}^2} - l_1 &\leq 0.5\lambda; \\ l_1^2 + S_{13}^2 &\leq l_1^2 + l_1\lambda + 0.25\lambda^2; \\ S_{13}^2 &\leq l_1\lambda + 0.25\lambda^2. \end{aligned}$$

Враховуючи (17), отримуємо, що віддаль між антенами  $A_1$  і  $A_3$  повинна задовольнити нерівність

$$S_{13}^2 \leq \frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda^2}{720} + 0.25\lambda^2,$$

або

$$S_{13} \leq \sqrt{\frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda^2}{720} + 0.25\lambda^2} \quad (19)$$

### 2.4. Залежність для допустимої верхньої межі вимірювання другою парою антен

Максимальна віддаль  $l_1$ , до якої можна вимірювати за допомогою пари антен  $A_1$  і  $A_3$ , визначається з нерівності

$$l_3 - l_1 \geq \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}. \quad (20)$$

Розв'язуючи цю нерівність з врахуванням, що  $l_3^2 = l_1^2 + S_{13}^2$ , отримуємо

$$l_1^2 + S_{13}^2 \geq l_1^2 + \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_1}{180} + \left(\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}\right)^2;$$

$$S_{13}^2 \geq \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda l_1}{180} + \left(\frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{360}\right)^2$$

або

$$l_1 \leq \frac{180S_{13}^2}{\Delta\varphi_{кр}\lambda} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{720} \quad (21)$$

Отже, за допомогою пари антен  $A_1$  і  $A_3$  можна однозначно вимірювати віддаль між снарядом-маяком і антеною  $A_1$ , якщо вона задовольняє нерівність (21).

### 2.5. Вираз для максимальної віддалі до снаряда-маяка, яку можна визначити другою парою антен

Якщо віддаль між антенами  $A_1$  і  $A_3$  дорівнює максимально допустимій, тобто

$$S_{13} = \sqrt{\frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda^2}{720} + 0.25\lambda^2},$$

то за допомогою цих антен можна вимірювати максимальну віддаль до снаряда-маяка, яка визначається виразом

$$l_{1\max} = \frac{180}{\Delta\varphi_{кр}\lambda} \left( \frac{180S_{12}^2}{\Delta\varphi_{кр}} - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda^2}{720} + 0.25\lambda^2 \right) - \frac{\Delta\varphi_{кр}\lambda}{720}. \quad (22)$$

Таблиця

Обчислені віддалі між антенами і до снаряда-маяка при  $\lambda = 0.693$  м і  $\Delta\varphi_{кр} = 2^\circ$

$S_{12}$ , м		Пара антен $A_1A_2$				Пара антен $A_1A_3$					
		$l_{1\min}$ , м		$l_{1\max}$ , м		$l_{1\min}$ , м		$S_{13\max}$ , м		$l_{1\max}$ , м	
$0,5\lambda$	0,346	0	0	22,5 $\lambda$	15,6	22,5 $\lambda$	15,6	4,74 $\lambda$	2,29	2047 $\lambda$	1419
$\lambda$	0,693	0,75 $\lambda$	0,52	90 $\lambda$	62,4	90 $\lambda$	62,4	9,48 $\lambda$	6,57	8123 $\lambda$	5629
2 $\lambda$	1,386	3,75 $\lambda$	2,59	360 $\lambda$	249,5	360 $\lambda$	249,5	60,0 $\lambda$	41,6	32423 $\lambda$	22469

Отже, встановивши віддаль між антенами першої пари  $A_1$  і  $A_2$   $S_{12} = 2\lambda = 1,39$  м, а між антенами другої пари  $A_1$  і  $A_3$   $S_{13\text{макс}} = 41,6$  м, можна досягнути, використовуючи заданий фазометр на основі мікросхеми AD8302, визначення максимальної віддалі до снарядамаяка 22,5 км, що дорівнює порядку дальності стрільби з артилерійської системи Д-30.

### Висновки

На основі проведених теоретичних аналізів меж дозволеної області вимірювання координати снарядамаяка на траєкторії за допомогою пасивної різницево-фазової радіолокаційної системи, зокрема, залежностей між різницями фаз радіохвилі, яка приходить від радіомаяка до двох і трьох рознесених антен, і віддальми маяк-антени та антена-антена, можна стверджувати про можливість практичної реалізації такої системи для отримання поправок і корекції артилерійської стрільби. Запропонована

система не поступається за технічними характеристиками відомим активним радіолокаційним системам типу АРК. Перевагою системи є електромагнітна невидимість. Результати можуть бути використані для автоматизованого керування стрільбою артилерії.

### Список літератури

1. Чигінь В.І., Свідерок С.М., Красюк О.П., Кузьменко Р.В., Смичок В.Д. Експериментальна установка для дослідження балістики снарядів на моделі. Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції, Хмельницький, 19 листопада 2010 р. – С. 182-183.
2. Чигінь В.І., Свідерок С.М. Спосіб отримання поправок для стрільби. Патент № 58085, зареєстровано 25.03.2011.
3. Чигінь В.І., Свідерок С.М., Смичок В.Д., Проць О.Р., Гуцак Р.І. Пасивна різницево-часова і фазова радіолокаційна система для вимірювання параметрів траєкторії снарядів і мін. Військово-технічний збірник. Львів: АСВ, 2012, №2(5). – С. 82-85.

## ГРАНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ СНАРЯДА-МАЯКА И ГЕОМЕТРИЯ АНТЕННЫ ПАССИВНОЙ РАЗНОСТНО-ФАЗОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В.И. Чигинь

*Теоретически определены границы разрешенной области измерения координаты снарядамаяка на траектории с помощью пассивной разностно-фазовой радиолокационной системы. Установлены аналитические зависимости между разностями фаз радиоволны, которая приходит от радиомаяка до двух и трех разнесенных антенн, и расстояниями маяк-антенны и антенна-антенна. Эти зависимости исследовались для случая размещения антенн на прямой, перпендикулярной направлению прямолинейного движения маяка. Показано, что использование радиомаяка с частотой излучения 433 МГц и фазометра на основе микросхемы AD8302 позволяет, при расстоянии между двумя антеннами равной длине полуволны или длине волны 0,693 м, измерять расстояние маяк-антенна в пределах 30-120 м. При увеличении расстояния между антеннами до 3-5 длин волны можно достичь измерения расстояний порядка 1000-3000 м. Наличие трех антенн позволяет использовать одну пару антенн для измерения малых расстояний, а вторую пару – больших расстояний.*

**Ключевые слова:** пассивная радиолокация, разностно-фазовая система, радиомаяк, антенны, область измерений

## LIMITS OF THE SHELL-BEACON COORDINATE MEASUREMENT AND ANTENNA GEOMETRY OF PASSIVE PHASE-DIFFERENCE RADAR SYSTEMS

V. Chyhin

*The permitted limits for measurement of the coordinates of shell-beacon on a trajectory by means of the phase-difference passive radar system are theoretically defined. Analytical relationships between the phase difference of radio waves, which comes from the beacon to two and three spaced antennas and the distances for beacon-antennas and antenna-antenna are established. These dependencies are investigated for cases of placing of two or three antennas on a line perpendicular to the direction of linear motion of the beacon. It is shown that the use of the beacon with a frequency radiation of 433 MHz and of the phasemeter based on the chip of AD8302 allows, at the distance between two antennas equal to length of half-wave or wave length of 0.693 m, to measure the beacon-antenna distance within 30-120 m. By increasing the distance between antennas to 3-5 of wave lengths there can be achieved the edistance measuring of the order of 1000-3000 m. Presence of thre eantennas allows to use one pair of antennas to measure small distances, and these second pair – large distances*

**Key words:** passive radar, difference-phase system, radio beacon, antenna, measuring area.