

такого закону. Запропоновано конструктивну схему вібраційного транспортера на основі тримасової коливної системи з дебалансним вібраційним приводом горизонтальних коливань та ексцентриковим віброприводом вертикальних коливань. Робочий орган вібротранспортера з'єднується з проміжним каркасом пружною системою вертикальних коливань, жорсткість якої налаштована на режим, віддалений від резонансу. Реактивний каркас з'єднується з проміжним каркасом пружною системою горизонтальних коливань, жорсткість якої забезпечує білярезонансний режим. Представлений вібраційний транспортер дозволить суттєво підвищити швидкість транспортування у безвідривних режимах, необхідних для переміщення вибухонебезпечних вантажів, а також збільшити кути підйому вантажів та зменшити вібрацію, яка передається у навколишнє середовище, що сприятиме його використанню у військовій техніці. Окреслено також ряд проблем, які потрібно розв'язати при конструюванні та впровадженні таких транспортних засобів у військовій техніці.

**Ключові слова:** вібраційний транспортер, незалежні горизонтальні та вертикальні коливання

УДК: 621.396.96:623.54

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.16-22>

З.М. Грабчак, Ю.М. Косовцов

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 19 April 2022; Revised 25 April 2022; Accepted 2 May 2022

## РОЗШИРЕННЯ ІНТЕРВАЛУ ОДНОЗНАЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПОЧАТКОВОЇ ФАЗИ СИГНАЛУ ТРИКАНАЛЬНОЇ ДВОЧАСТОТНОЇ КОГЕРЕНТНОЇ РЛС

Розвинуті теоретичні та практичні положення забезпечення однозначності визначення початкової фази радіолокаційного сигналу, які на відміну від відомих дозволяють розширити інтервал однозначності повної фази багатоканальної і багаточастотної когерентної РЛС до десятків метрів при радіолокаційному зондуванні в сантиметровому діапазоні з частотами порядку 10 ГГц. Отримана математична модель формування різниці фаз за різними частотами передавальних каналів триканальної двочастотної станції. Розроблені аналітичні залежності розрахунку прецизійних значень координат польоту снаряда за даними різниці фаз за різними частотами передавальних каналів триканальної двочастотної станції та проведені дослідження точності їх розрахунку. Показано, що потенційна точність розрахунку координат польоту снаряда за різними значеннями швидкості польоту та кута кидання снаряда знаходиться в межах  $(10^{-6} \div 10^{-10})$  м.

**Ключові слова:** снаряд, радіолокаційний сигнал, радіолокаційна станція, повна фаза, квадратурні складові, частота, координати польоту снаряда, антена, моделювання.

### Вступ

**Постановка проблеми в загальному вигляді та аналіз літератури.** Перспективним напрямом визначення складових сили опору повітря є підхід, заснований на відновленні їх аеродинамічних коефіцієнтів на основі експериментальних даних балістичних стрільб, який полягає в тому, що значення коефіцієнтів визначається на основі наближеного та/або точного рішення рівнянь просторового руху снаряда за результатами вимірювання параметрів польоту снаряда [1, 2]. При проведенні балістичних стрільб застосовують як універсальні, так і спеціальні методи вимірювань, які використовують обладнання, спеціально розроблене для вимірювання параметрів польоту снаряда із заданими технічними, метрологічними та експлуатаційними характерис-

тиками [3, 4]. Визначення параметрів польоту снаряда, а саме координат і швидкості польоту снаряда, розробка методів приведення швидкості до дульного зрізу ствола гармати та методів її нормалізації, являє собою доволі відому задачу зовнішньої балістики, якій присвячена значна кількість підходів, починаючи від класичного методу вимірювання часу проходження снарядом ділянки траси визначеної довжини до сучасних методів, які базуються на рентгенометричних, радіо- і лазеролокаційних методах [2-5]. Водночас провідними науковцями балістичної дослідної лабораторії США оприлюднені точності показники, які досягнуті при визначенні аеродинамічних коефіцієнтів, які не повною мірою відповідають вимогам до точності розрахунку траєкторій польоту снаряда і, відповідно, точності складання Таблиць стрільби [3].

Найбільш сприятливим з точки зору точності визначення параметрів польоту снаряда є фазовий метод радіодальнометрії [6-7], який заснований на вимірюванні різниці фаз випромінюваних і прийнятих коливань радіолокаційного сигналу. В [8] розвинуті теоретичні та практичні засади визначення координат польоту снаряда з використанням триканальної одночастотної когерентної РЛС. Отримана математична модель формування повної фази радіолокаційного сигналу відбитого від снаряда, що рухається в повітрі, для станції, а також аналітичні залежності розрахунку прецизійних значень координат польоту снаряда за даними повних фаз радіолокаційного сигналу триканальної одночастотної станції. Показано, що потенційна точність визначення координат польоту снаряда за різницями повних фаз відбитого радіолокаційного сигналу складає  $(10^{-3} \div 10^{-5})$  м, що підтверджує можливість їх використання для вирішення задач розрахунку аеродинамічних коефіцієнтів снаряда. Принциповим недоліком визначення координат снаряда за зареєстрованими квадратурними складовими сигналу триканальної одночастотної РЛС є необхідність використання порівняно низьких частот зондування для забезпечення однозначності відновлення повних фаз. Зворотним боком використання низьких частот для типових снарядів калібру близько 100-200 мм є низька відбивна здатність снарядів у цих діапазонах хвиль із довжиною хвилі більшою величиною калібру снаряда. Вирішення цього протиріччя пропонується досягти штучним зниженням частоти зондуючого сигналу РЛС (приблизно з 10 ГГц до 0,1 ГГц) шляхом застосування триканальної двочастотної станції, в якій розглядаються різниці фаз за різними частотами передавальних каналів, що розташовані в максимальній наближеності одна до одної, виходячи з технічної спроможності приймальної станції. Так, за умови використання одночасного випромінювання двох частот, наприклад, 10 і 10,005 ГГц (відбивна здатність снаряда в цьому діапазоні висока), то різничева частота становитиме 0,005 ГГц, що відповідно і потрібно для отримання позитивного результату.

Таким чином, метою статті є розробка процедур забезпечення однозначності визначення початкової фази радіолокаційного сигналу за рахунок визначення різниці фаз за різними частотами передавальних каналів триканальної двочастотної РЛС.

## Основна частина

**1. Математична модель радіолокаційного сигналу відбитого від снаряда триканальної двочастотної РЛС.** В загальному випадку вимірювання координат просторового руху снаряда  $x, y, z$ , РЛС повинна мати один передавальний та три приймальних канали (рис. 1).

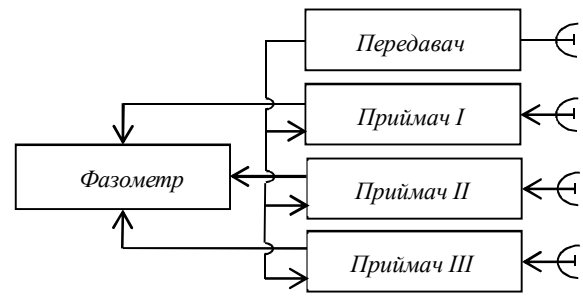


Рис. 1. Структурна схема триканальної РЛС

Схема прив'язки приймачів антени РЛС та снаряда, що рухається в повітрі, наведена на рис. 2,

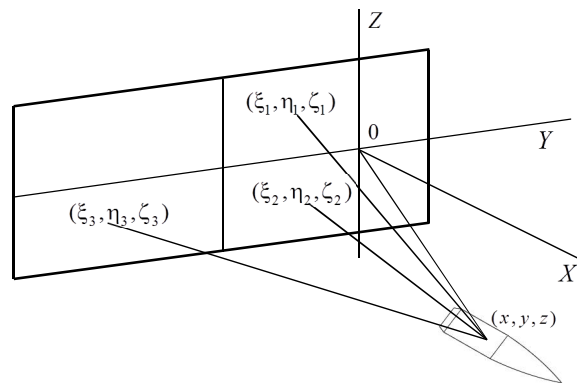


Рис. 2. Схема прив'язки систем координат приймачів антени та снаряда

де  $x, y, z$  – координати снаряда в системі координат, пов'язаної з антеною, м;  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  – координати приймачів на площині антени, м.

Відповідно, значення повної фази радіолокаційних сигналів у трьох прийомних каналах РЛС набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= k \left( \sqrt{x^2 + (y - \eta_1)^2 + (z - \zeta_1)^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right); \\ \Phi_2 &= k \left( \sqrt{x^2 + (y - \eta_2)^2 + (z - \zeta_2)^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right); \\ \Phi_3 &= k \left( \sqrt{x^2 + (y - \eta_3)^2 + (z - \zeta_3)^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Для підвищення точності вимірювання координат просторового руху снаряда  $x, y, z$ , пропонується штучне зниження частоти зондуючого сигналу РЛС шляхом застосування триканальної двочастотної станції, в якій розглядаються різниці фаз за різними частотами передавальних каналів, що розташовані в максимальній наближеності одна до одної, виходячи з технічної спроможності приймальної станції.

Значення квадратурних складових радіолокаційних сигналів в кожному приймальному каналі когерентних РЛС дорівнює:

$$\begin{aligned} C_i(t) &= R(t)\cos(\Phi_i(t)); \\ S_i(t) &= R(t)\sin(\Phi_i(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $R(t)$  – обвідна сигналу;  $\Phi(t)$  – повна фаза сигналу;  $C(t)$  та  $S(t)$  – відповідно, косинусна та синусна квадратури радіолокаційного сигналу.

Реєструючи квадратурні компоненти сигналів у кожній просторово рознесеній приймальній антені, є можливість відновити вже поза самого вимірювання квадратурні компоненти різниці фаз. Дійсно, різниця фаз прийнятих на різних частотах фаз з хвильовими числами  $k_1, k_2$  в точності відповідає різниці випромінюваних частот

$$\begin{aligned} \Phi_i^{\Delta k} &= \\ &= k_1 \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_i)^2 + (z - \zeta_i)^2} \right) - \\ &- k_2 \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_i)^2 + (z - \zeta_i)^2} \right) = \quad (3) \\ &= (k_1 - k_2) \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_i)^2 + (z - \zeta_i)^2} \right) = \\ &= \Delta k \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_i)^2 + (z - \zeta_i)^2} \right). \end{aligned}$$

Цей факт пояснює сенс штучного зниження частоти зондування.

За обчисленими координатами польоту снаряда  $x, y, z$  сформуємо ряд дискретних відліків різниці фаз за різними частотами в трьох приймальних каналах:

$$\begin{aligned} \Phi_1^{\Delta k} &= \Delta k \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_1)^2 + (z - \zeta_1)^2} \right); \\ \Phi_2^{\Delta k} &= \Delta k \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_2)^2 + (z - \zeta_2)^2} \right); \quad (4) \\ \Phi_3^{\Delta k} &= \Delta k \left( \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \eta_3)^2 + (z - \zeta_3)^2} \right), \end{aligned}$$

де  $\Delta k = k_1 - k_2$ ,  $k_1$  – хвильове число, що визначається частотою безперервного зондуючого сигналу  $f_1$ ;  $k_2$  – хвильове число, що визначається частотою безперервного зондуючого сигналу  $f_2$ .

Система рівнянь (4) легко розв'язується відносно значень координат снаряда. Отримані рішення дозволяють знаходити координати снаряда за різницями фаз за різними частотами  $\Phi_i^{\Delta k}$ .

**2. Відновлення різниці повної фази за відомими квадратурними складовими сигналу триканальної двочастотної РЛС.** При розрахунках в (3) приймемо, що обвідна сигналу дорівнює одиниці. Це припущення не суттєво впливає на розрахунки, оскільки для

відновлення фази сигналу виконується операція ділення синусної квадратури на косинусну, і обвідна при цьому еквівалентна 1.

Представимо різницю фаз між опорним каналом та рештою каналів приймальної станції через тригонометричні тотожності [9]:

$$\begin{aligned} \cos(\Phi_i - \Phi_1) &= \cos(\Phi_i^{\Delta k}) = \cos(\Phi_i)\cos(\Phi_1) + \sin(\Phi_i)\sin(\Phi_1); \\ \sin(\Phi_i - \Phi_1) &= \sin(\Phi_i^{\Delta k}) = \sin(\Phi_i)\cos(\Phi_1) - \cos(\Phi_i)\sin(\Phi_1), \end{aligned}$$

перетворюючи ці тотожності в квадратури від  $\Phi_i^{\Delta k}$ , та враховуючи (3), отримуємо

$$\begin{aligned} C_{i,1} &= C_1 S_i + S_1 S_i; \\ S_{i,1} &= C_1 S_i - C_i S_1, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $C_{i,1} = \cos(\Phi_i - \Phi_1) = \cos(\Phi_i^{\Delta k})$ ,  $S_{i,1} = \sin(\Phi_i - \Phi_1) = \sin(\Phi_i^{\Delta k})$  – відповідно косинусна та синусна квадратури різниці фаз радіолокаційних сигналів.

Враховуючи, що квадратури сигналу (5) визначаються періодичними функціями  $\sin$  та  $\cos$ , на початковому етапі відновлення фази відбувається в інтервалі періодичності  $[-\pi, \pi]$  за виразом

$$\begin{aligned} \Phi_i^{\Delta k} [-\pi, \pi] &= 2 \arctan \left[ \frac{S_{i,1}}{(1 + C_{i,1})} \right] = \\ &= 2 \arctan \left[ \frac{(1 - C_{i,1})}{S_{i,1}} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Наступний етап обчислень – це етап знаходження арктангенса (6), і далі процедура «випрямлення» фаз, тобто послідовне за набором відліків «пили» обчислення повної різниці фаз за допомогою додавання до попереднього значення повної фази числа  $2\pi$  при кожній перескоці «пили» фази з  $\pi$  на  $-\pi$  або віднімання  $2\pi$  при перескоці «пили» фази з  $-\pi$  на  $\pi$ . У розглянутому випадку це завдання сильно спрощується, оскільки кількість перескоків «пили» суттєво зменшується.

**3. Аналітичні залежності визначення координат польоту снаряда за вимірними даними квадратур радіолокаційних сигналів триканальної двочастотної станції РЛС та оцінка їх точностних характеристик.** Розв'язуючи систему рівнянь (4) відносно  $x, y, z$ , за умов, що нам відомі координати приймачів радіолокатора в площині антени –  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$ , можна розрахувати координати польоту снаряда. При згаданих нижче параметрах антени (10), координати снаряда, через вимірні значення різниць повних фаз, виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
x = & \left[ \frac{1}{(\Phi_1^{\Delta k} + \Phi_3^{\Delta k})^2} \left( (0.2276 - 0.4146(\Phi_2^{\Delta k})^2 - 0.4146(\Phi_3^{\Delta k})^2)(\Phi_1^{\Delta k})^4 + (0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^3 + \right. \right. \\
& + 0.8293(\Phi_3^{\Delta k})^3 - 0.4553\Phi_2^{\Delta k} - 0.4553\Phi_3^{\Delta k})(\Phi_1^{\Delta k})^3 + \left( -0.4146(\Phi_3^{\Delta k})^4 + (-0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^2 + 1.3660) \right) \times \\
& \times (\Phi_3^{\Delta k})^2 + (0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^3 - 0.4553\Phi_2^{\Delta k})\Phi_3^{\Delta k} - 0.7500 - 0.4146(\Phi_2^{\Delta k})^4 + 1.3660(\Phi_2^{\Delta k})^2 \Big) (\Phi_1^{\Delta k})^2 + \\
& + \left( -0.4553(\Phi_3^{\Delta k})^3 + (0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^3 - 0.4553\Phi_2^{\Delta k}) \right) (\Phi_3^{\Delta k})^2 + \left( -0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^4 + 0.9106(\Phi_2^{\Delta k})^2 \right) \Phi_3^{\Delta k} - \\
& - 0.9106(\Phi_2^{\Delta k})^3 + 0.5000\Phi_2^{\Delta k} \Big) \Phi_1^{\Delta k} + \left( 0.2276 - 0.4146(\Phi_2^{\Delta k})^2 \right) (\Phi_3^{\Delta k})^4 + \left( 0.8293(\Phi_2^{\Delta k})^3 - \right. \\
& - 0.4553\Phi_2^{\Delta k} \Big) (\Phi_3^{\Delta k})^3 + \left( -0.7500 - 0.4146(\Phi_2^{\Delta k})^4 + 1.3660(\Phi_2^{\Delta k})^2 \right) (\Phi_3^{\Delta k})^2 + \left( -0.9106(\Phi_2^{\Delta k})^3 + \right. \\
& \left. \left. + 0.5000\Phi_2^{\Delta k} \right) \Phi_3^{\Delta k} + 0.2745 - 0.5000(\Phi_2^{\Delta k})^2 \right]^{1/2}; \tag{7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y = & \frac{1}{\Phi_1^{\Delta k} + \Phi_3^{\Delta k}} \left( 0.4553 \left\{ (\Phi_1^{\Delta k})^2 \Phi_2^{\Delta k} - (\Phi_1^{\Delta k})^2 \Phi_3^{\Delta k} - \Phi_1^{\Delta k} (\Phi_2^{\Delta k})^2 + \Phi_1^{\Delta k} (\Phi_3^{\Delta k})^2 - \right. \right. \\
& \left. \left. - (\Phi_2^{\Delta k})^2 \Phi_3^{\Delta k} + \Phi_2^{\Delta k} (\Phi_3^{\Delta k})^2 - 1.0981\Phi_2^{\Delta k} + 1.0981\Phi_3^{\Delta k} \right\} \right); \tag{8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z = & \frac{1}{\Phi_1^{\Delta k} + \Phi_3^{\Delta k}} \left( 0.4553 \left\{ -(\Phi_1^{\Delta k})^2 \Phi_2^{\Delta k} - (\Phi_1^{\Delta k})^2 \Phi_3^{\Delta k} + \Phi_1^{\Delta k} (\Phi_2^{\Delta k})^2 + \Phi_1^{\Delta k} (\Phi_3^{\Delta k})^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + (\Phi_2^{\Delta k})^2 \Phi_3^{\Delta k} - \Phi_2^{\Delta k} (\Phi_3^{\Delta k})^2 - 1.0981\Phi_1^{\Delta k} + 1.0981\Phi_2^{\Delta k} \right\} \right). \tag{9}
\end{aligned}$$

Для оцінки точності визначення координат польоту снаряда  $x, y, z$  проведено чисельне моделювання розрахунку їх абсолютної похибки за різними значеннями швидкості польоту снаряда та кута кидання.

В якості еталонних значень координат польоту снаряда  $x, y, z$  використані дані, що отримані при розв'язанні математичної моделі просторового руху снаряда ОФ-540Ж 152-мм самохідної гаубиці 2С3М [10, 11], яка реалізована програмно на основі стандартної підпрограми чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, написаною в програмному середовищі Maple з табличними (розрахунковими) геометричними, інерційно-ваговими характеристиками і аеродинамічними коефіцієнтами сил та моментів снаряда [12].

При чисельному моделюванні процедур відновлення координат снаряда за зареєстрованими квадратурними складовими сигналу триканальної двочастотної РЛС з безперервним монохроматичним випромінюванням прийняті наступні значення параметрів:

час реєстрації траєкторії – 5 с;

число відліків на траєкторії – 5000;

початкові швидкості ( $V_0$ ) – [190, 410, 650], м/с;

початкові кути кидання ( $\theta_0$ ) – [10, 200, 1000], тис;

значення координат фазових центрів приймальних антен

$$\left\{ \eta_1 = \frac{1}{2}, \eta_2 = 1, \eta_3 = -1, \zeta_1 = -\frac{1}{2}, \zeta_2 = -1, \zeta_3 = -2 \right\}, \tag{10}$$

схема розташування яких, щодо системи координат відносно площини антени, наведена на рис. 3;

швидкість електромагнітної хвилі, 299792458, м/с;

частота безперервного зондуючого сигналу:

$$f_1 = 10.0000 \cdot 10^9, \text{ Гц};$$

$$f_2 = 10.0050 \cdot 10^9, \text{ Гц};$$

довжина хвилі:

$$\lambda_1 = 0.02979, \text{ м};$$

$$\lambda_2 = 0.02982, \text{ м};$$

хвильове число:

$$k_1 = 209.5845, 1/\text{м};$$

$$k_2 = 210.6347, 1/\text{м}.$$

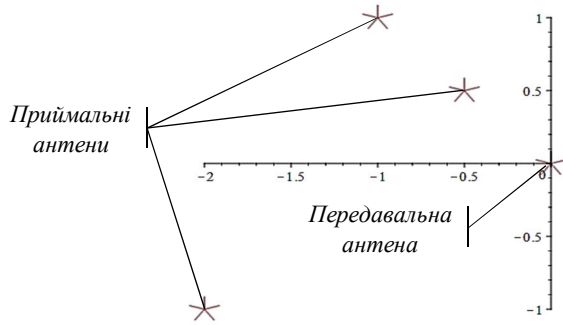
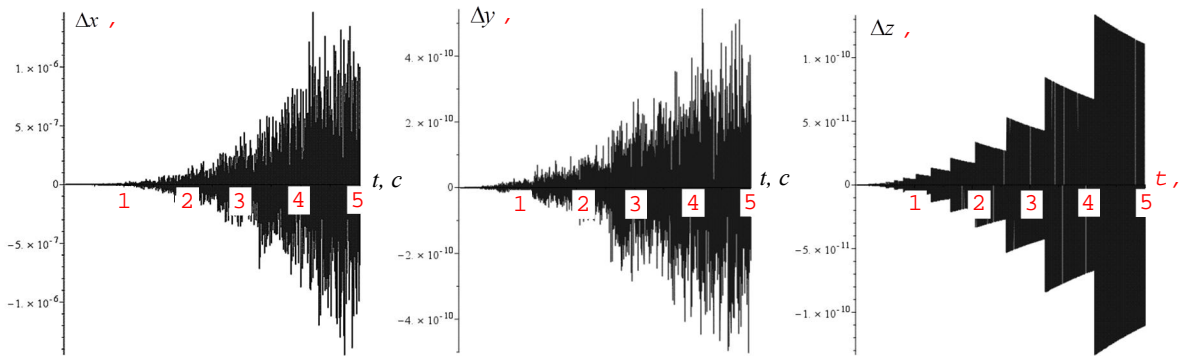


Рис. 3. Схема розташування координат фазових центрів антен відносно площини антени

На рис. 4 представлені графіки різниці відновлених за вимірними квадратурами повної фази сигналу координат снаряда  $x, y, z$  і координат обчислених на основі математичної моделі просторового руху снаряда ОФ-540Ж 152-мм самохідної гаубиці 2С3М.

З наведених графіків видно, що на всіх швидкостях польоту снаряда та кутах кидання похибка знаходиться в межах  $(10^{-6} \div 10^{-10})\text{м}$ , та дозволяє визначити аеродинамічні коефіцієнти снаряда із заданою точністю.

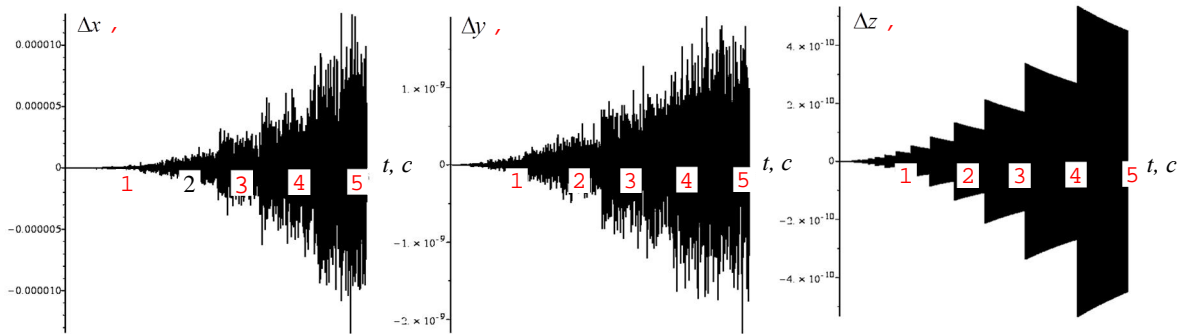


$$V_0 = 190 \text{ м/с}, \theta_0 = 10 \text{ тис.}$$

а) координата  $x$

б) координата  $y$

в) координата  $z$



$$V_0 = 650 \text{ м/с}, \theta_0 = 1000 \text{ тис.}$$

а) координата  $x$

б) координата  $y$

в) координата  $z$

Рис. 4. Графіки абсолютної похибки відновлення координат снаряда за квадратурними складовими радіолокаційних сигналів

## Висновки

У статті розвинуті процедури забезпечення однозначності визначення початкової фази радіолокаційного сигналу, які на відміну від відомих дозволяють

розширити інтервал однозначності багатоканальної і багаточастотної когерентної РЛС до десятків метрів при радіолокаційному зондуванні в сантиметровому діапазоні з частотами порядку 10 ГГц та забезпечують

відновлення повних фаз радіолокаційного сигналу із заданою точністю.

Отримана математична модель формування різниці фаз за різними частотами передавальних каналів триканальної двочастотної станції.

Розроблені аналітичні залежності розрахунку прецизійних значень координат польоту снаряда за даними різниці фаз за різними частотами передавальних каналів триканальної двочастотної станції та проведені дослідження точності їх розрахунку.

Потенційна точність визначення координат польоту снарядів за даними вимірювання квадратури різниці фаз радіолокаційних сигналів когерентної РЛС з безперервним монохроматичним випромінюванням за різними значеннями швидкості польоту та кута кидання снаряда знаходиться в межах  $(10^{-6} \div 10^{-10})$  м, що підтверджує можливість їх використання для вирішення задач розрахунку аеродинамічних коефіцієнтів снаряда.

Подальшим напрямом досліджень є розширення інтервалу однозначності відновлення початкової фази сигналу когерентної РЛС за рахунок застосування чотириканальної двочастотної станції, в якій крім різниці фаз за різними частотами передавальних каналів двочастотної станції розглядаються різниці фаз між опорним приймальним каналом та рештою приймальними каналами чотириканальної станції.

### Список літератури

1. Беневольтский С.В., Бурлов В.В., Казаковцев В.П. и др. под ред. Л.Н. Лысенко *Баллистика: учеб. для курсантов и слушателей ГРАУ. Пенза: ПАИИ, 2005. 510 с.*
2. Грабчак В.І., Бондаренко С.В. Аналіз існуючих та перспективних методів визначення сили опору повітря руху снарядів. *Військово-технічний збірник. Львів, 2013. Вип. 2 (9). С. 13-19. DOI: 10.33577/2312-4458.9.2013.13-19*
3. McCoy R.L. *Modern Exterior Ballistics: Schiffer Military History* Atglen, PA, 2012. 328 p.
4. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. *Внеинная баллистика: учебник для студентов вузов. Москва: Машиностроение, 2005. 608 с.*
5. Ветров В.В., Клочков В.Д., Осин А.И. и др. под редак. Садкова В.Ю. *Методы и средства измерения экспериментальной баллистики: учебник. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 320 с.*
6. Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девотчак В.В. ред. Ботов М.И. *Введение в теорию радиолокационных систем: монография. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. 346 с.*
7. Коростылёв А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. под ред. Дулевича В. Е. *Теоретические основы радиолокации. Москва: Сов. радио, 1978. 608 с.*
8. Грабчак З.М. Відновлення координат польоту снаряда за квадратурними складовими сигнала РЛС *Застосування СВ ЗС України у конфліктах сучасності: матеріали наук.-техн. конф., 18 листопада 2021 р., Львів НАСВ. С. 123.*

9. Дубовик В.П., Юрик І.І. *Вища математика: підручник. Київ: А.С.К., 2006. 648 с.*

10. Грабчак В.І., Бондаренко С.В., Стеців С.В. Математична модель руху снаряда з гіроскопічною стабілізацією навколо його центру мас. *Системи озброєння і військова техніка. Харків, 2014. Вип. 4 (40). С. 21-27.*

11. Грабчак В.І., Бондаренко С.В., Стеців С.В. Математична модель руху центру мас снаряда з гіроскопічною стабілізацією. *Військово-технічний збірник. Львів, 2014. Вип. 2 (11). С. 7-12. DOI: 10.33577/2312-4458.11.2014.7-12*

12. Рослова Н.П. *Таблицы стрельбы 152-мм самоходной гаубицы 2С3 (2С3М): учебник. Москва: Воениздат., 1984. 216 с.*

### References

1. Benevolskiy S.V. Burlov V.V., Kazakovcev V.P. and etc. edited by Lyisenko L.N. (2005), "*Ballistika: uchebnik dlya kursantov i slushateley GRAU*" [Ballistics: textbook for cadets and students of Main Missile and Artillery Directorate]: Tutorial, PAII, Penza, 510 p. [in Russian].
2. Hrabchak V.I. and Bondarenko S.V. (2013), "*Analiz isnuuychykh ta perspektyvnykh metodiv vyznachennia syly oporu povitria rukhu snariadiv*" [Analysis of existing and promising methods for determining the air resistance of projectiles]. *Military Technical Collection. Lviv, 2013. Issue № 2 (9). pp. 13-19. DOI: 10.33577/2312-4458.9.2013.13-19* [in Ukrainian].
3. McCoy R.L. (2012), *Modern Exterior Ballistics: Schiffer Military History*, Atglen PA, 328 p.
4. Dmitrievskij A.A. and Lyisenko L.N. (2005), "*Vneshnjaja ballistika: uchebnik dlja studentov vuzov*" [External ballistics: a textbook for university students]: Tutorial, Mechanical engineering, Moscow, 608 p. [in Russian].
5. Vetrov V.V., Klochkov V.D., Osin A.I. and etc. edited by Sadkov V.Yu. (2005), "*Metody i sredstva izmerenija jeksperimental'noj ballistiki*" [Methods and means for measuring experimental ballistics]: Tutorial, Tula State University Publishing House, Tula, 320 p. [in Russian].
6. Botov M.I., Vjahirev V.A. and Devotchak V.V. edited by Botov M.I. (2012), "*Vvedenie v teoriju radiolokacionnyh sistem*" [Introduction to the theory of radar systems]: Monograph, Siberian Federal University, Krasnojarsk, 346 p. [in Russian].
7. Korostylev A.A. Kljuev N.F. and Mel'nik Ju.A. edited by Dulevich V.E. (1978), "*Teoreticheskie osnovy radiolokacii*" [Theoretical foundations of radar]: Tutorial, Sov. Radio, Moscow, 608 p. [in Russian].
8. Hrabchak Z.M. (2021), "*Vidnovlennia koordynat polotu snariada za kvadraturnymi skladovymi syhnalu RLS*" [Restoration of projectile flight coordinates by quadrature components of the radar signal]. *Application of the JI of the Armed Forces of Ukraine in modern conflicts: materials of scientific and technical Conference, Lviv, p. 123.*
9. Dubovik V.P. and Yuryk I.I. (2006), "*Vyshcha matematyka*" [Higher mathematics]: Tutorial, A.S.K., Kyiv, 648 p. [in Ukrainian].
10. Hrabchak V.I., Bondarenko S.V. and Stetsiv S.V. (2014), "*Matematychna model rukhu snariada z hiroskopichnoiu stabilizatsiieiu navkolo yoho tsentru mas*" [Mathematical model

of projectile motion with gyroscopic stabilization around its center of mass]. *Weapons systems and military equipment*. Kharkiv, 2014. Issue № 4 (40). pp. 21-27. [in Ukrainian].

11. Hrabchak V.I., Bondarenko S.V. and Stetsiv S.V. (2014), Грабчак В.І. "Математична модель руху тєнтру мас снаряда з гіроскопічною стабілізацією" [Mathematical model of motion of the center of mass of a projectile with gyroscopic stabilization].

*Military Technical Collection*. Lviv, 2014. Issue № 2 (11). pp. 7-12. DOI: 10.33577/2312-4458.11.2014.7-12 [in Ukrainian].

12. Roslova N.P. (1984), "Tablicy strel'by 152-mm samohodnoj gaubicy 2S3 (2S3M)" [Firing tables for 152-mm self-propelled howitzer 2S3 (2S3M)]: Tutorial, Military publishing, Moscow, 216 p. [in Russian].

### EXTENSION OF THE UNIQUE INTERVAL OF RECOVERY OF THE INITIAL PHASE OF A SIGNAL OF A THREE-CHANNEL TWO-FREQUENCY COHERENT RADAR

Z. Hrabchak, Yu. Kosovtsov

*The article reveals the theoretical and practical provisions for ensuring the unambiguity of determining the initial phase of the radar signal, which, unlike the known ones, allows expanding the unambiguity interval of a multi-channel and multi-frequency coherent radar to tens of meters with radar sounding in the centimeter range with frequencies of the order of 10 GHz. Procedures have been developed to ensure the unambiguity of determining the initial phase of the radar signal by determining the phase difference behind different frequencies of the transmitting channels of a three-channel two-frequency station. A mathematical model is obtained for the formation of the phase difference behind different frequencies of the transmitting channels of a three-channel two-frequency station. The mathematical model makes it possible to find the coordinates of the projectile for the phase difference data for different frequencies of the station's transmitting channels. The procedures for restoring the total phase difference behind the known quadrature components of the signal of a three-channel two-frequency station are disclosed. Analytical dependencies for calculating precision values of projectile flight coordinates based on phase difference data for different frequencies of the transmitting channels of a three-channel two-frequency station have been developed and studies of the accuracy of their calculation have been carried out. To assess the accuracy of determining the coordinates of the flight of the projectile, a numerical simulation of the calculation of their absolute error for different values of the projectile flight speed and angle of throw was carried out. As reference values of projectile flight coordinates, the data obtained by solving the mathematical model of the spatial motion of the OF-540Zh projectile of the 152-mm self-propelled howitzer 2S3M were used. It is shown that the potential accuracy of calculating the projectile flight coordinates is based on the data of measuring the quadrature of the phase difference of radar signals of a coherent radar with continuous monochromatic radiation for different values of the flight speed and angle of the projectile is within  $(10^{-6} \div 10^{-10})$  m.*

**Keywords:** projectile, radar signal, radar station, total phase, quadrature components, frequency, projectile flight coordinates, antenna, modeling.

УДК 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.22-27>

П.П. Ткачук, Л.Д. Величко, М.І. Войтович, М.І. Сорокатий

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

*Article history:* Received 04 February 2022; Revised 08 February 2022; Accepted 2 May 2022

### ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ПОЧАТКОВОЇ ШВИДКОСТІ СНАРЯДА НА КІНЕМАТИКУ СНАРЯДА

*У роботі використовується математична модель визначення сили лобового опору повітря рухові снаряда, яка базується на розв'язуванні оберненої задачі динаміки. Знаючи дальності лету снаряда при певних кутах прицілювання, наведених в таблицях стрільб, визначається функціональна залежність сили лобового опору повітря рухові снаряда від його швидкості та інших чинників, також з врахуванням дії на снаряд його ваги і Коріолісової сили. Встановлено, що в залежності від кута прицілювання швидкість снаряда під час лету може поєднувати етапи руху зі швидкостями надзвуковою, підзвуковою, дозвуковою спадною або зростаючою. Досліджено вплив відхилень початкової швидкості від номінального значення для*