

## РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОЧАСТОТНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ДАЛЬНОМЕТРІЇ ТА ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ

Визначено початкові дані математичного моделювання: параметри цілей, приймально-передавальної апаратури, вимірювальних сигналів, вимірювальних пристроїв. Розроблено математичні вирази, які враховують вплив нерівномірності АЧХ та ФЧХ приймально-передавальної апаратури радіолокатора, нестабільності генератора зондувальних сигналів, похибки вимірювання параметрів відбитих сигналів. Наведено основні етапи алгоритму математичної моделювання методу багаточастотної фазової дальнометрії та вимірювання радіальної швидкості.

**Ключові слова:** фазова дальнометрія, радіолокаційна система, дальність, радіальна швидкість, Доплерівський зсув частоти, похибка, частота.

V.R. LIUBCHYK, M.O. LANTVOYT  
Khmelnytsky National University

### DEVELOPMENT OF SIMULATION MATHEMATICAL MODEL OF MULTIFREQUENCY PHASE METHOD OF RADAR RANGING AND MEASURE THE RADIAL VELOCITY

**Abstract** – Determined the initial data of mathematical modeling: parameters purposes, receiving and transmitting equipment, measuring signals meters. The mathematical expressions which take into account the impact of uneven frequency response and phase response receiving and transmitting equipment radar, instability of generator of probing signal, measurement errors by the parameter of the reflected signals. The basic steps of the algorithm of mathematical modeling method of multifrequency phase ranging and measurement of radial velocity.

Proposed in the expression to find the total value of the reflected signals taken radar station during the probing harmonic signals in a given frequency range with a given step. These expressions take into account the instability frequency probing signal measuring error of amplitude and phase shift signals, frequency response receiving and transmitting equipment, measurement error frequency. To identify the impact of these factors on the level of accuracy necessary to carry out mathematical modeling several times and conduct statistical analysis. The accuracy of the results obtained will depend on the size of the sample, the larger the sample the more accurate you can get addition.

**Keywords:** phase ranging, radar system, range, radial velocity, Doppler frequency shift, the error, frequency.

#### Вступ

Задачі радіолокаційного спостереження займають важливе місце в сучасності. Їх застосовують для вирішення різноманітних задач: спостереження за наземною, морською та повітряною обстановкою. З часів виникнення науки про радіолокацію винайдено багато методів вимірювання дальності радіолокаційних цілей [1]. До основних методів вимірювання дальності відносяться імпульсний, частотний та фазовий методи. Найбільш поширеним є імпульсний метод вимірювання внаслідок їх простоти технічної реалізації, наглядності представлення вимірювальної інформації тощо. Недоліками їх є низька точність вимірювання та роздільна здатність через скінчену тривалість зондувального радіоімпульсу. Застосування частотних методів обмежене задачами вимірювання висоти цілей над рівнем поверхні. Хоча вони мають більшу точність через використання як вимірювального параметру частоти. Серед усіх методів дальнометрії найбільш точними є фазові методи, тому як вимірювання фазового зсуву проводиться з більшою точністю ніж вимірювання часових інтервалів. Основним недоліком фазових методів є неможливість розділити дві і більше цілей. Тому і використовують для високоточного вимірювання дальності одного об'єкту.

Розроблені в роботах методи багаточастотної фазової вимірювання дальності багатьох цілей [2, 3, 4] дозволяють проводити зондування багатьох цілей гармонічними сигналами в обмеженому частотному діапазоні та розділяти сигнали відбиті від кожної цілі шляхом відповідних математичних розрахунків. Підвищення точності вимірювання досягається шляхом застосування поширення багаточастотної фазової методу на випадок багаточастотної фазової методу дальнометрії [5].

Для виявлення загальних особливостей багаточастотної фазової методу було проведено математичне моделювання шляхом задавання дальності цілей, коефіцієнтів відбиття, розрахунку сумарних відбитих сигналів на декількох частотах, введення похибок вимірювання фазового зсуву та амплітуди, проведення розрахунків дальності та статистична обробка отриманих результатів [6]. Проте проведене моделювання не враховує перетворення зондувальних сигналів в область високих частот, зворотне перетворення на проміжну частоту, фільтрацію, демодуляцію та ще низку інших чинників які вносять негативний вплив на зондувальні сигнали та результати вимірювання.

Також в роботі [7] розроблено багаточастотний фазовий метод радіолокаційного вимірювання дальності та радіальної швидкості цілей. Якій полягає у розділенні сигналів по частоті Доплерівського зсуву та окремому визначенні дальності об'єктів із однаковими швидкостями.

Тому задачею даної роботи визначення початкових даних для проведення імітаційного математичного моделювання роботи багаточастотної фазової методу вимірювання дальності та радіальної швидкості рухомих цілей.

#### Основна частина

Задачею імітаційного моделювання є виявлення впливу різних чинників на кінцевий результат якого-небудь процесу без проведення натурального експерименту. Для цього необхідно ретельно проаналізувати протікання усіх залежностей, обрати математичні моделі які їх адекватно описують, встановити обмеження, розробити алгоритми математичного моделювання і, після написання комп'ютерної програми, провести математичне імітаційне моделювання із наступною статистичним та математичним аналізом отриманих результатів.

У випадку багаточастотної фазової методу вимірювання дальності та радіальної швидкості описаних в роботах [2-4] із застосуванням багаточастотної підходу [5] в радіолокації [7] потрібно виявити

усі початкові дані методу та усі чинники що впливають на проходження сигналів, вимірювання їх параметрів та математичні перетворення. До вхідних параметрів цілей відносяться:

кількість цілей –  $T$ ;  
 дальність цілей –  $R_{tar}$ , м;  
 ефективна площа розсіяння цілей (ЕПР) –  $s_i$ ;  
 радіальні швидкості цілей –  $v_{tar}$ , м/с.  
 Параметри зондувальних сигналів:  
 потужність зондувального сигналу –  $P_0$ ;  
 початкова частота зондувального сигналу –  $f_0$ , Гц;  
 приріст по частоті зондувального сигналу –  $\Delta f$ , Гц;  
 носійна частота –  $F_0$ , МГц;  
 проміжна частота –  $F_{п}$ , МГц.  
 Параметри приймально-передавальної апаратури:  
 АЧХ тракту приймання-передавання –  $K(f)$ ;  
 ФЧХ тракту приймання-передавання –  $\varphi(f)$ .  
 Параметри вимірювальних пристроїв:  
 похибка вимірювання амплітуди сигналу –  $\Delta A$ , Вт;  
 похибка вимірювання фазового зсуву сигналу –  $\Delta \varphi$ , °;  
 нестабільність частоти зондувального сигналу –  $\sigma_f$ .

В роботах [3, 7, 8] наведено дослідження проходження гармонічних сигналів під час зондування ними цілей на різних частотах, виведені математичні моделі що описують процес утворення сумарних відбитих сигналів. Необхідно доопрацювати ці моделі шляхом введення в них опису процесів впливу різних чинників наведених вище.

По-перше на частоту зондувального радіосигналу впливає ефект Доплера, що приводить до зміщення частоти сигналу:

$$\Delta F_{д,tar} = \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i \pm F_0). \quad (1)$$

Внаслідок прояву ефекту Доплера частота зондувального сигналу для різних цілей буде різною, тому і сигнал відбитий від кожного об'єкту буде різний. Для однієї цілі потужність радіосигналу на  $i$ -й частоті відбитого від неї з урахуванням нестабільності частоти зондувального сигналу описується виразом на:

$$P_{i,tar} = P_0 \left( \frac{s_{tar}}{4\pi R_{tar}^2} \right)^2 e^{-4\pi R_{tar} \frac{f_i \pm F_0 \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i \pm F_0) \pm \sigma_f \cdot f_i \cdot round}{c}}. \quad (2)$$

Сумарний сигнал на  $i$ -й частоті представляє собою суму усіх сигналів відбитих від усіх цілей і буде описуватись виразом:

$$P_{\Sigma i} = \sum_{tar=0}^N P_0 \left( \frac{s_{tar}}{4\pi R_{tar}^2} \right)^2 e^{-4\pi R_{tar} \frac{f_i \pm F_0 \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i \pm F_0) \pm \sigma_f \cdot f_i \cdot round}{c}}. \quad (3)$$

Застосувавши вираз (3) для  $2N$  частот можна знайти усі сумарні сигнали відбиті від усіх цілей. Для врахування частотних характеристик приймально-передавальної апаратури потрібно помножити вираз (3) на комплексний коефіцієнт передачі:

$$P_{\Sigma i} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot \sum_{tar=0}^N P_0 \left( \frac{s_{tar}}{4\pi R_{tar}^2} \right)^2 e^{-4\pi R_{tar} \frac{f_i \pm F_0 \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i \pm F_0) \pm \sigma_f \cdot f_i \cdot round}{c}}. \quad (4)$$

Наступним етапом проходження сигналів є зворотне перетворення на проміжну частоту. При чому через похибку встановлення частоти гетеродину може виникати похибка перетворення. Проте внаслідок того що проміжна частота набагато менше за носійну, то похибкою перетворення можна знехтувати. Так само можна знехтувати і похибкою перетворення на нульову частоту під час перетворення для знаходження дальності. Метод багаточастотного фазового вимірювання дальності передбачає вимірювання амплітуд і фазових зсувів сумарних сигналів відбитих від цілей на усіх частотах. Зрозуміло, що вимірювання відбуваються з похибками. Для врахування похибки необхідно передбачити випадкову складову у вирах (4) яка змінює амплітуду і фазовий зсув. В такому разі вираз (4) набуде вигляду:

$$P_{\Sigma R} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot \sum_{tar=0}^N P_0 \left( \frac{s_{tar}}{4\pi R_{tar}^2} \right)^2 \cdot e^{-4\pi R_{tar} \frac{f_i \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i) \pm \sigma_f \cdot f_i \cdot round}{c}} \pm P_0 \cdot round \cdot \frac{\Delta P}{2} \cdot e^{\pm j \cdot round \cdot \frac{\Delta \varphi}{2}}. \quad (5)$$

Під час знаходження радіальної швидкості перетворення з проміжної на нульову частоту проводиться лише для однієї бічної смуги. Тому похибка нестабільності частоти буде зберігатись і проявляться як похибка вимірювання швидкості. В такому разі амплітуда і фазовий зсув не вимірюється а лише частота спектральних складових. В такому разі значення сигналу буде мати вигляд:

$$P_{\Sigma v} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot \sum_{tar=0}^N P_0 \left( \frac{s_{tar}}{4\pi R_{tar}^2} \right)^2 \cdot e^{2\pi f_i t - 2\pi (f_0 + f_i) \frac{v_{tar}}{c} t - 4\pi R_{tar} \frac{f_i \pm \frac{v_{tar}}{c} (f_i) \pm \sigma_f \cdot f_i \cdot round}{c}}. \quad (6)$$

Для математичного моделювання з метою визначення впливу похибок перетворення, вимірювання та параметрів апаратури потрібно скористатись виразами (5) та (6) для знаходження сигналів, які отримуємо

в результаті зондування і зворотного перетворення із вимірюванням. Після отримання значень сигналів необхідно скористатись алгоритмом багаточастотного фазового вимірювання дальності та радіальної швидкості описаних в роботах (2) та (7) відповідно. Після знаходження дальності та радіальної швидкості необхідно повторити процес моделювання достатню кількість раз для отримання достатньої вибірки та провести статистичну обробку результатів з метою виявлення математичних очікувань та середньоквадратичних відхилень.

Таким чином, узагальнений алгоритм імітаційного математичного моделювання багаточастотного фазового методу вимірювання дальності та радіальної швидкості полягає у наступних етапах:

- розрахунок параметрів сигналів з урахуванням похибок та інших чинників;
- застосування алгоритму багаточастотного фазового вимірювання дальності та радіальної швидкості;
- повторення моделювання достатню кількість разів для отримання необхідної величини вибірки та статистична обробка отриманих результаті.

В результаті проведення статистичної обробки є можливим отримати відхилення математичного очікування від істинного значення та середньоквадратичне відхилення.

### Висновки

Запропоновані у роботі вирази знаходять значення сумарних відбитих сигналів, які приймаються радіолокаційною станцією під час зондування гармонічними сигналами в заданому діапазоні частот із заданим кроком. Дані вирази враховують нестабільність частоти зондувальних сигналів, похибки вимірювання амплітуди та фазового зсуву сигналів, частотні характеристики приймально-передавальної апаратури, похибку вимірювання частоти. Для виявлення впливу вказаних чинників на похибку потрібно провести математичне моделювання декілька разів і провести статистичну обробку. Точність отриманих результатів буде залежати від величини вибірки, тобто чим більша вибірка тим точніше можна отримати залежності.

### Література

1. Радиолокационные и радионавигационные системы : [учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов] / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М. : Радио и связь, 1994. – 296 с.
2. Шинкарук О.М. Аналітичний багаточастотний фазовий метод вимірювання дальностей / О.М. Шинкарук, В.Р. Любчик, М.О. Лантвойт // Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 52. – С. 72–78.
3. Shynkaruk O. M., Liubchik V. R., Lantvoit M. O. Study of accuracy of measurement range of multifrequency phase method. *European Applied Sciences*. Stuttgart, Germany. 2014. №2. С. 93–96.
4. Шинкарук О.М. Дослідження методичної похибки аналітичного багаточастотного фазового методу вимірювання дальностей / О.М. Шинкарук, В.Р. Любчик, М.О. Лантвойт // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 5. – С. 149–152.
5. Lantvoit M. Synthesis Many Scales Method in case of Multifrequency Phase-ranging Objects / M. Lantvoit, O. Kylymnyk // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (TCSET–2014), 25 лютого – 1 березня 2014 року, Львів – Славське. – С. 782.
6. Любчик В.Р. Моделювання багаточастотного фазового методу вимірювання дальностей до багатьох об'єктів / В.Р. Любчик, О.М. Шинкарук, М.О. Лантвойт // Наукова конференція "Фізико-теоретичні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- і мікроелектроніки". Чернівці, 24-26 жовтня 2013 р. – С. 9–100.
7. Любчик В.Р. Применение аналитического многочастотного фазового метода измерения дальностей для решения задач радиолокации / В.Р. Любчик, О.М. Шинкарук, М.О. Лантвойт // Материалы 23 Міжнар. Кримської конф. "КриМіКо 2013. СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології", 8–14 вересня 2013 р., Севастополь, 2013. – С.1202-1203.
8. Любчик В.Р. Розробка та дослідження математичної моделі проходження гармонійних радіосигналів за наявності багатьох об'єктів / В.Р. Любчик // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 6. – С. 130–135.

### References

1. Radiolokatsionnyie i radionavigatsionnyie sistemyi : [ucheb. posobie dlya radiotehn. spets. vuzov] / P.A. Bakulev, A.A. Sosnovskiy. – M. : Radio i svyaz, 1994. – 296 s.
2. Shynkaruk O.M. Anallitichniy bagatochastotniy fazoviy metod vimiryuvannya dalnostey / O.M. Shynkaruk, V.R. Lyubchik, M.O. Lantvoit // VIsnik NTUU "KPI". Seriya – Radlotehnika. Radioaaparobuduvannya. – 2013. – 52. – S.72–78.
3. Shynkaruk O. M. Study of accuracy of measurement range of multifrequency phase method/ O. M. Shynkaruk, V. R. Liubchik, M. O. Lantvoit // *European Applied Sciences*. Stuttgart, Germany – 2014. -2. – S. 93-96.
4. Shynkaruk O.M. Doslidzhennya metodichnoyi pohibki analitichnogo bagatochastotnogo fazovogo metodu vimiryuvannya dalnostey/ O.M. Shynkaruk, V.R. Lyubchik, M.O. Lantvoit // Herald of Khmelnytsky National University. – 2013. – 5. – С. 149–152.
5. Lantvoit M. Synthesis Many Scales Method in case of Multifrequency Phase-ranging Objects / M. Lantvoit, O. Kylymnyk. - III Mizhnarodna naukovno-tehnichna konferentsiya «Suchasni problemi radloelektroniki, telekomunkatsiy ta komp'yuternoYi InzheneriYi» (TCSET–2014), 25 lyutogo – 1 bereznya 2014 roku, Lvlv – Slavsko, UkraYina, - S. 782.
6. Lyubchik V.R. Modelyuvannya bagatochastotnogo fazovogo metodu vimiryuvannya dalnostey do bagatoh ob'ektiv/ V.R. Lyubchik, O.M. Shynkaruk, M.O. Lantvoit // Naukova konferentsiya "Fiziko-teoretichni problemi radlotehnichnih pristroYiv, zasoblv telekomunkatsiy, nano- i mlkroelektroniki". ChernIvtsI, 24-26 zhovtnya 2013r. – S. 99-100.
7. Lyubchik V.R. Primenenie analiticheskogo mnogochastotnogo fazovogo metoda izmereniya dalnostey dlya resheniya zadach radiolokatsii / V.R. Lyubchik, O.M. Shynkaruk, M.O. Lantvoit // Materialyi konferentsii KriMiKo 2013 23-a Mizhnarodna Krimaska konferentsiya - SVCh-tehnika I telekomunkatsiyI tehnologiyi, 8-14 veresnya 2013 r., Sevastopol, 2013, S.1202-1203.
8. Lyubchik V.R. Rozrobka ta doslidzhennya matematichnoyi modell prohodzhennya garmoniynih radlosignallv za nayavnostl bagatoh ob'ektiv / V.R. Lyubchik // VIsnik Hmelnitskogo natsionalnogo unlvrsitetu. – 2013. – 6. – С. 130–135.