

Ю.В. ФОРКУН, Д.А. МАКАРИШКІН, В.В. БЕРЕЗОВЧУК, А.М. ПАЛЕВСЬКИЙ  
Хмельницький національний університет

## МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В статті наведено дослідження методів вимірювання дальності, які здійснюються автоматизованими системами керування літальними апаратами. Представлені результати дослідження встановлюють, що методи вимірювання дальності для автоматизації процесів керування літальними апаратами відрізняються між собою та характеризуються великою кількістю різноманітних параметрів, в зв'язку з чим не існує одного універсального методу та засобу для їх виявлення. Для виявлення цілей за допомогою систем автоматизації процесів керування літальними апаратами, що ґрунтуються на використанні коливальних процесів по первинному інформативному параметру виділяють такі методи вимірювання дальності, як амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, частотно-фазовий, часовий та резонансний.

**Ключові слова:** автоматизована система керування літальними апаратами, методи вимірювання дальності, радіолокатор, радіолокаційна станція.

Y.V. FORKUN, D.A. MAKARYSHKIN, V.V. BEREZOVCHUK, A.M. PALEVSKII  
Khmelnytskyi National University

### METHODS OF DETECTION AND DETERMINATION OF RANGE BY AUTOMATED AIRCRAFT CONTROL SYSTEMS

The paper presents a study of methods for measuring range, which are carried out by automated aircraft control systems. The results of the study show that the methods of measuring range for automation of aircraft control processes differ from each other and are characterized by a large number of different parameters, so there is no one universal method and means for their detection. The analysis of methods for measuring the range of automation systems for aircraft control processes showed that electromagnetic fields are used to identify targets, which provide information about the characteristics of the studied control objects. To identify targets with the help of aircraft control automation systems based on the use of oscillating processes on the primary informative parameter, such methods of measuring range as amplitude, phase, amplitude-phase, frequency-phase, time and resonance are distinguished. According to the problem different methods of distance measurement are used. A significant disadvantage of most methods is the low measurement accuracy, and only the multiscale phase method has a higher measurement accuracy. The only significant disadvantage of the phase method is that due to the overlap of signals reflected from multiple objects, cosine signals of the same frequency are superimposed, so there is a complete lack of resolution. These mathematical transformations establish how to find the phase shift between two harmonic signals reflected from two measurement targets, but to find the distances it is necessary to know the phase shift of each signal.

**Key words:** automated aircraft control system, range measurement methods, radar, radar station.

#### Вступ

Будь-який радіолокатор систем автоматизації процесів керування літальними апаратами працює в трьох режимах: пасивний, активний та вибір рухомих цілей. Пасивний режим означає, що сигнал, що приймається радіолокаційним приймачем системи автоматизації процесів керування літальними апаратами, формується в результаті відбиття (розсіювання) цілі електромагнітного коливання, що випромінюється радіолокаційною антеною і випромінюється до цілі (рис. 1) [1].

На відміну від пасивного режиму, в активному режимі передавач основного каналу радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами не генерує жодного імпульсу, але генерує пакет кодів, який є запитом до реагуючого апарату літака. У приймачі основного каналу парні відштовхувальні імпульси декодуються, перетворюються в єдиний імпульс і потім подаються в звичайний пасивний блок (рис. 2).

Робота пристрою передачі систем автоматизації процесів керування літальними апаратами основного каналу в режимі SRC подібна до роботи в пасивному режимі. Різниця полягає у зміні швидкості повторення та тривалості імпульсів модуляції та детектування. Метод когерентного імпульсу з внутрішньою псевдокогерентністю використовується для вибору рухомих цілей. У відповідному блоці реалізується оцінка зміни фазового значення прийнятого сигналу протягом періоду повторення імпульсу. Однак режим SRC не може виміряти радіальну швидкість літака, оскільки доплерівський зсув протягом тривалості імпульсу виявлення практично неможливо виміряти з необхідною точністю.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Всі відомі системи радіолокаційного спостереження в автоматизації процесів керування літальними апаратами у районах аеропортів призначені для вимірювання радіальної швидкості літаків. Це їх істотний недолік, оскільки час між виявленнями в одному напрямку становить 4-6 секунд. У цей період, коли

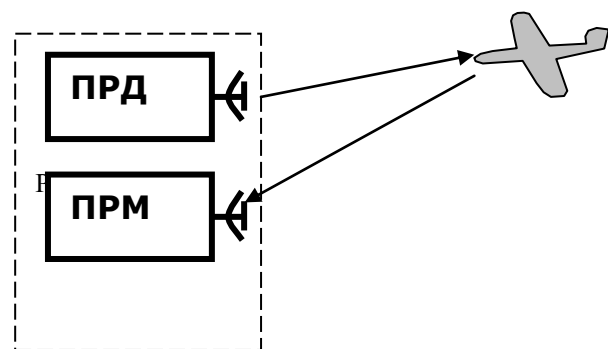


Рис. 1. Пасивний режим роботи аеродромної РЛС

швидкість літака становить 400 км/год, літак може змінити своє положення на 444–667 м, а коли швидкість літака 500 км/год, його можна змінити на 555–833 м. В обох випадках відстань, яку пролітає літак, дуже велика, і якщо два літаки перебувають на цих відстанях, не знаючи векторного сегмента швидкості літака, неможливо передбачити можливість небезпечної ситуації. Більше того, незважаючи на відповідну систему попередження про радіо зіткнення на борту літака, додатковий контроль диспетчера може бути корисним.

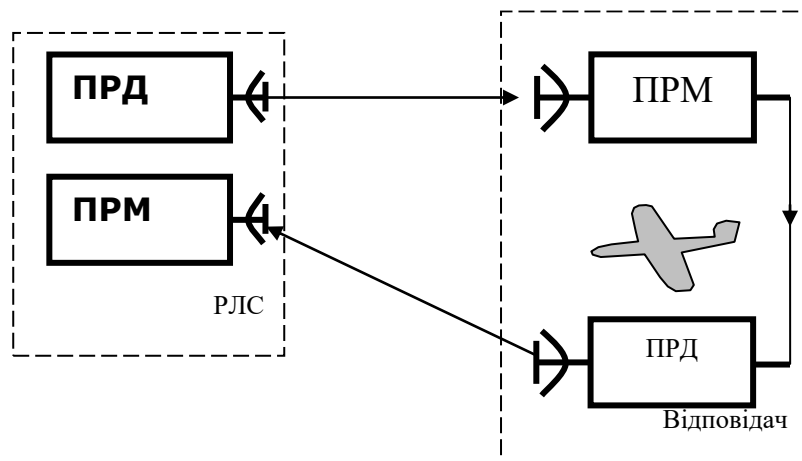


Рис. 2. Активний режим роботи аеродромної РЛС

Через очевидні помилки вимірювання частоти блок вимірювання зсуву частоти Доплера не використовується при побудові радарів для обстеження аеропортів. Отже, оскільки тривалість зондового імпульсу становить одиничні порядки величини або від одного до декількох десятків нс, несуча частота становить приблизно один-два ГГц. У цьому випадку похибка вимірювання частоти традиційними методами велика [34].

Поєднуючи вищезазначену ситуацію, завданнями для подальшої роботи є:

1. Аналіз відомих методів далекомірів, що використовуються в радарних системах автоматизації процесів керування літальними апаратами, приділяючи особливу увагу методу побудови далекомірів.
2. Вивчіть точність та роздільну здатність передових методів для вимірювання координат.
3. Розробити імітаційні математичні моделі, алгоритми комп'ютерних програм та математично моделювати процес визначення координат у разі визначення цілей та характеристик далекомірної системи та її алгоритму.
4. Використати вимірювання відстані щоб розробити структурну схему радіолокаційної системи та автоматизованої системи керування літальними апаратами.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Радіолокатори систем автоматизації процесів керування літальними апаратами у пасивному режимі виконують дві основні функції: вимірювання відстані до та вимірювання азимуту, і якщо вимірювання азимуту залежить від ширини діаграми спрямованості випромінюючої антени, швидкості повороту антени тощо, тоді вимірювання відстані до залежить від застосовуваних методів дальнометрії.

У всіх радіодальномірах відстань до до цілі  $R$  визначається часом запізнення у часі відбитого сигналу:  $t_R = 2R/c$ , де  $c$  – швидкість проходження радіохвилі.

Вимірявши цей час, можна визначити відстань до цілі  $R = 0,5ct_R$  з миттєвою відносною похибкою:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta t_R}{t_R} \tag{1}$$

Припускаючи, що  $\frac{\Delta R}{R}$  та  $\Delta t_R$  випадкові і незалежні величини, знаходять відносну точність радіодальноміра:

$$\frac{\sigma_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t_R}}{t_R}\right)^2} \tag{2}$$

Дисперсія  $\sigma_c^2$  обумовлена точністю, з якою відома швидкість проходження радіохвилі і її непостійністю вздовж траси. Точність визначення швидкості радіохвилі  $c$  складає  $\sigma_c/c = 10^{-9}$ . Але в атмосфері  $\sigma_c/c = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ , тому навіть за відсутності апаратних помилок гранична точність вимір відстані до залежить від того, наскільки точно відоме значення  $c$ , а також можливості врахування

Фазовий метод далекометрії дозволяє вимірювати відстань до на несущій значенню частоти  $\omega_0$ . [3]

Зондувальним сигналом є неперервне гармонійне коливання яке має вигляд:

$$s_1(t) = U_{m1} \cos \phi_1 = U_{m1} \cos(\Omega_m t + \phi_{01}), \tag{3}$$

де  $\Omega_m$  – кутова частота сигналу масштабної частоти, в найпростішому разі  $\Omega_m = \omega_0$ .

Відбитий сигнали має вигляд:

$$s_2(t) = U_{m2} \cos \varphi_2 = U_{m2} \cos(\Omega_m(t - t_R) + \varphi_{01} + \varphi_{an} + \varphi_{\text{відб}}), \quad (4)$$

де  $U_{m1}, U_{m2}$  – значення амплітуди сигналів;  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – миттєві значення фази сигналів;  
 $\varphi_{01}$  – початкове значення фази;  
 $\varphi_{an}$  – зсув фази в апаратурі радіодальноміра;  
 $\varphi_{\text{відб}}$  – зсув значень фази при відбитті сигналу від об'єкту.

За допомогою фазометра визначають фазову різницю  $\varphi_{\Delta}$  опорного (зондувального) і відбитого сигналів:

$$R = \frac{c(\varphi_{\Delta} + \varphi_{an} + \varphi_{\text{відб}})}{2\Omega_m}. \quad (5)$$

Зсув фаз  $\varphi_{an}$  можна виключити шляхом калібрування, вимірюючи зсув фаз прямого проходження сигналу через тракти передавача і приймача. Зміни значень фази при відбитті сигналу  $\varphi_{\text{відб}}$  сильно означають на точність, тому як при відбитті від металів і діелектриків  $\varphi_{\text{відб}}$  змінюється на  $180^\circ$ . Тому зазвичай обирають  $\Omega_m < \omega_0$  і працюють в режимі модуляції сигналу радіочастоти. В такому разі, величиною  $\varphi_{\text{відб}}$  можна знехтувати і рівняння виміру приймає вигляд [2, 3]:

$$R = \frac{c}{2\Omega_m} \varphi_{\Delta} = M_{\varphi} \varphi_{\Delta}, \quad (6)$$

де  $M_{\varphi} = \frac{c}{2\Omega_m} = \frac{\lambda}{4\pi}$  – масштабний коефіцієнт ( $\lambda = \frac{c}{F_m}$ ).

Точність виміру відстані до фазовим способом має залежність:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta M_{\varphi}}{M_{\varphi}} + \frac{\Delta \varphi_{\Delta}}{\varphi_{\Delta}}, \quad (7)$$

враховуючи незалежність  $\Delta M_{\varphi}$  і  $\Delta \varphi_{\Delta}$ :

$$\sigma_R = \sqrt{\varphi_{\Delta}^2 \sigma_M^2 + M_{\varphi}^2 \sigma_{\varphi}^2}, \quad (8)$$

де  $\sigma_M^2$  і  $\sigma_{\varphi}^2$  – дисперсії зміни масштабного коефіцієнту і зміни значень фази відповідно.

Багатошкальні методи в основному застосовують в радіолокації, радіонавігації, геодезії. Багатошкальний метод полягає в тому, що з його допомогою додаткового вимір на грубішій шкалі, що відповідає нижчій значенню частоти тестового сигналу  $\omega_H$ , визначають число цілих циклів зміни фазового зсуву  $n$ . Значення  $\omega_H$  повинно забезпечувати однозначний результат вимірювання, тобто задовольняється умова  $\varphi_H = \omega_H \tau_H < 2\pi$ ; де  $\tau_H$  – час затримки сигналу з частотою  $\omega_H$ ;  $\varphi_H$  – зсув фаз в межах сигналу з частотою  $\omega_H$ . Потім визначають результат вимір за виразом:

$$\tau_{\phi} = \frac{(n + \varphi_B / 2\pi)}{f_B}. \quad (9)$$

де  $\varphi_B$  – вимірюване значення фазового зсуву  $0 \leq \varphi_B \leq 2\pi$  на заданій значенню частоти  $f_B$ . Число  $n$  краще знайти з умови:

$$n = \left[ \frac{\varphi_H \omega_B}{2\pi \omega_H} \right]^+. \quad (10)$$

де  $[Y]^+$  – ціла частина числа  $Y$ .

Частотні методи виміру відстані до цілей ґрунтуються на використанні неперервного сигналу з частотною модуляцією за симетричним або несиметричним законом. При лінійному законі ЧМ (рис. 3)

через запізнення відбитого сигналу на час  $t_R$ , миттєва різниця частоти сигналів випроміненого  $f_1$  і прийнятого  $f_2$  дорівнює  $F_6 = f_1(t) - f_2(t) = \left(\frac{\partial f(t)}{\partial t}\right) t_R$ . Внаслідок того, що передавач і приймач радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами мають обмежені діапазони частот, на практиці застосовують періодичні закони модуляції ЧМ [3].

Основне рівняння частотного радіолокатора систем автоматизації процесів керування літальними апаратами має вигляд [3]:

$$R = \frac{v_x \cdot F_6}{4\Delta f \cdot F_M} \tag{11}$$

Структура частотного радіолокатора-висотоміра систем автоматизації процесів керування літальними апаратами представлена на рисунку 4.

Особливістю частотних радіолокаторів систем автоматизації процесів керування літальними апаратами є дискретний характер залежності вимірної відстані до  $R_b$  від фактичної  $R_\phi$ . Тому як спектр сигналу биттів складається з частотних компонент кратних значенню частоти модуляції. Тому як найменша частота биттів  $F_{6\min} = F_M$ , то мінімальна відстань до яку можна виміряти [3]:

$$R_{\min} = \frac{v_x}{4\Delta f} \tag{12}$$

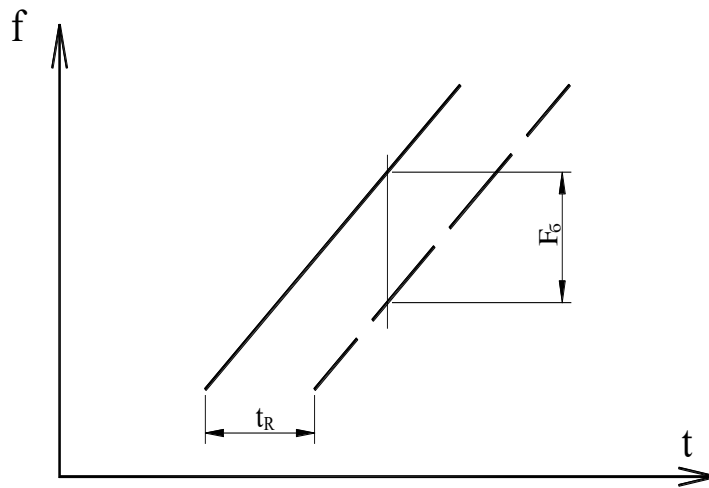


Рис. 3. Принцип частотного методу виміру дальності

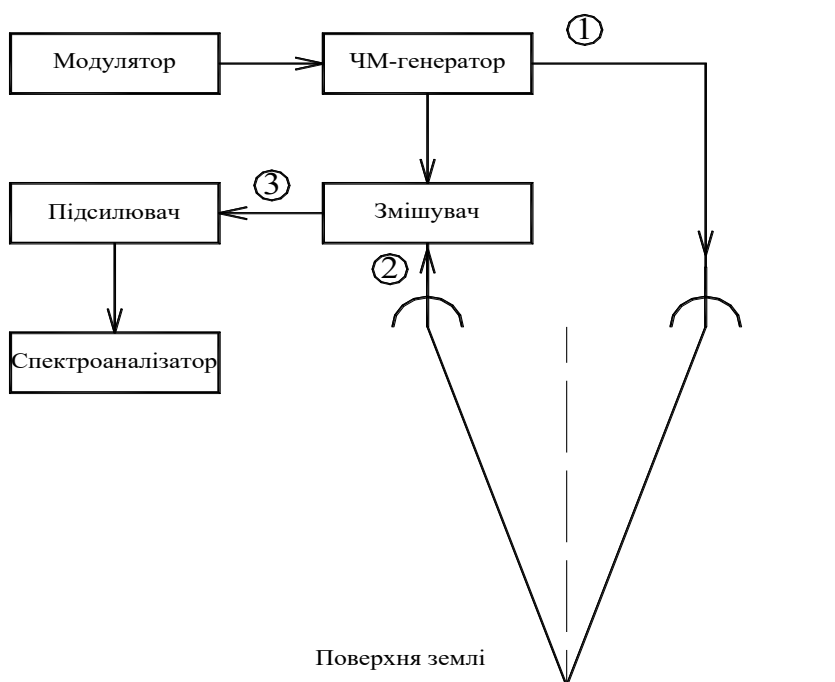


Рис. 4. Структура частотного радіолокатора-висотоміра систем автоматизації процесів керування літальними апаратами

Із зростанням  $R$  в спектрі сигналу биттів послідовно з'являються частоти  $2F_M$ ,  $3F_M$  і т. д., тому частота биттів змінюється на  $F_M$ , а відстань до на  $\Delta R = R_{\min}$ . Отже, для підвищення точності вимір відстані до необхідно збільшувати девіацію частоти  $\Delta f$ .

Точність виміру відстані до частотним способом можна знайти за виразом [4]:

$$\sigma_R = \sqrt{F_0^2 \sigma_M^2 + M_F^2 \sigma_F^2}, \quad (13)$$

де  $M_F = \frac{v_x}{4\Delta f \cdot F_M}$  – масштабний коефіцієнт. В частотних дальномірах значення  $M_F$  задають

постійним, шляхом стабілізації  $F_M$  та  $\Delta f$ . Тоді  $\sigma_R = M_F \cdot \sigma_F$ .

Серед усіх методів радіолокаційного дослідження часові методи із визначенням часової затримки є найбільш простими [3]. Серед переваг даних методів є наочність та простота визначення дальності. Суть методу полягає у визначенні часової затримки імпульсної зондувальної послідовності, яка є пропорційною подвоєній відстані до об'єкту. Для зондування застосовують імпульсні сигнали тривалістю  $\tau$  та періодом повторення  $T_{\text{п}}$ . Враховуючи різну швидкість проходження електромагнітних хвиль в різних середовищах  $v_x$  та час затримки сигналу відбитого від  $i$ -го об'єкту  $\tau_i$ , відстань до цілей визначається із виразу:

$$D_i = \frac{v_x \tau_i}{2}. \quad (14)$$

При проходженні прямокутних імпульсів по колам передавача, середовищу, колам приймача, їхня форма спотворюється і стає відмінною від прямокутної. Це пояснюється змінною їх частотного спектру відповідно до частотних характеристик електронних кіл та середовища, а також частотною дисперсією середовища. Внаслідок цього форма імпульсів із прямокутною перетворюється на форму близьку до Гаусівського імпульсу. В такому разі важко визначити початок імпульсу та його тривалість. Отже, розрізнення імпульсів, що прийшли від різних цілей або цілей можливе якщо можливе розрізнення мінімальної затримки часу  $\Delta t_{\min}$ . Відомо, що для радіоімпульсів однакової амплітуди, розрізнення за дальністю визначається тривалістю радіоімпульсу  $\tau_{0.5}$  на рівні 0.5 від максимальної амплітуди, тобто  $\Delta t_{\min} = \tau_{0.5}$ , звідки:

$$D_{\min} = \frac{v_x \tau_{0.5}}{2}. \quad (15)$$

З метою зменшення габаритів приймальної та передавальної антен, зондувальні імпульси модулюють високочастотним гармонійним сигналом (рис. 5).

Із збільшенням відношення сигнал / шум точність вимірювання часового інтервалу покращується. Для досягнення цієї вимоги потрібно збільшити енергію сигналу виявлення, що, в свою чергу, призводить до необхідності збільшення амплітуди імпульсу, що не завжди можливо. Крім того, чим вища частота сигналу модуляції, тим вища точність і роздільна здатність вимірювання відстані.

Для підвищення точності та роздільної здатності протягом останніх десятиліть використовувались надширокопasmові (НШС) сигнали виявлення. Однією з характеристик цього сигналу є те, що він займає ефективний діапазон частот спектра сигналу. Як правило, спектр частот сигналу НШС займає смугу частот від декількох сотень мегагерц до декількох гігагерц. Такий широкий діапазон частот сигналу дозволяє отримувати інформацію про об'єкти в трьох смугах частот. По-перше, коли довжина хвилі сигналу виявлення перевищує розмір цілі (діапазон частот Релея). По-друге, коли довжина хвилі пропорційна розміру цілі (резонансний діапазон частот). По-третє, коли довжина хвилі менше цільового розміру (високочастотний діапазон) [2, 3].

Інформативні властивості сигналу, що вкладаються у розрізняльну спроможність виражаються числом спектральних ліній в складі його спектру. Наприклад, для розрізнення двох цілей ( $Q=2$ ) за допомогою радіосигналу, необхідно мінімум п'ять спектральних ліній [5].

У радарях, радіонавігації, ехолотах систем автоматизації процесів керування літальними апаратами безконтактний метод вимірювання відстані також може бути використаний для визначення координат цілей при виявленні дефектів, діагностиці радіохвиль та неруйнівних випробувань.

Відповідно до вирішуваної задачі використовуються різні методи вимірювання відстані. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики імпульсного, частотного та фазового методів вимірювання відстані. Суттєвим недоліком більшості методів є низька точність вимірювання, і лише багатомасштабний фазовий метод має вищу точність вимірювання. Єдиним суттєвим недоліком фазового методу є те, що внаслідок накладення сигналів, відбитих від безлічі об'єктів, косинусні сигнали однакової частоти накладаються, тому роздільної здатності повністю бракує.

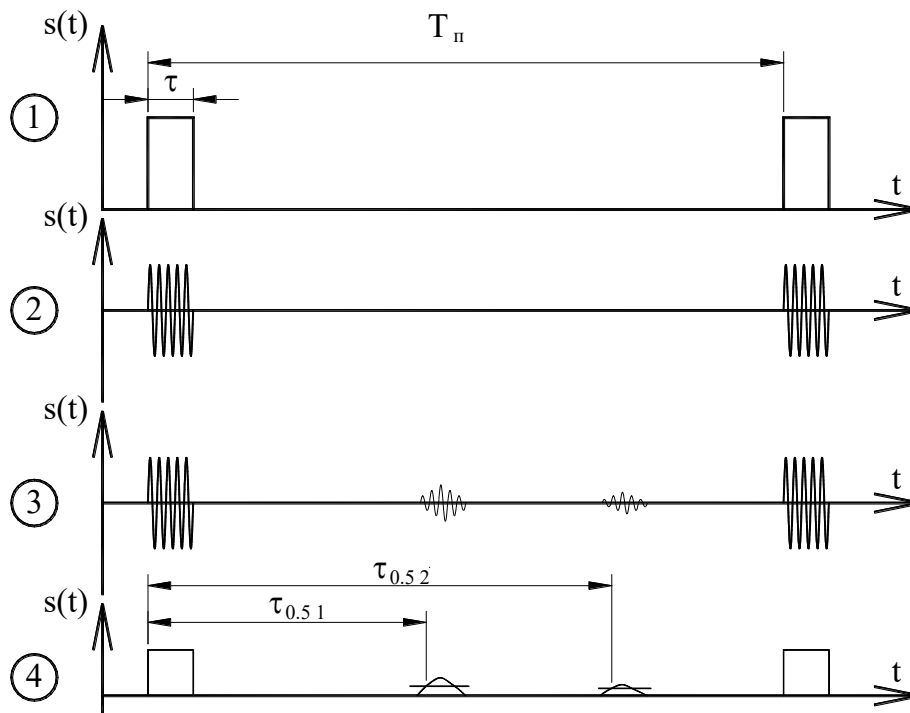


Рис. 5. Імпульсний методи визначення відстані до об'єктів

Відповідно до вирішуваної задачі використовуються різні методи вимірювання відстані. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики імпульсного, частотного та фазового методів вимірювання відстані. Суттєвим недоліком більшості методів є низька точність вимірювання, і лише багатомасштабний фазовий метод має вищу точність вимірювання. Єдиним суттєвим недоліком фазового методу є те, що внаслідок накладення сигналів, відбитих від безлічі об'єктів, косинусні сигнали однакової частоти накладаються, тому роздільної здатності повністю бракує.

Приведені математичні перетворення встановлюють, як можна знайти зсув фаз між двома, відбитими від двох цілей вимірювання, гармонійними сигналами, але для знаходження відстаней необхідно знати зрушення фаз кожного сигналу. Для цього доцільно застосувати теорему синусів та розв'язати систему рівнянь.

Таблиця 1

**Порівняльні характеристики методів вимірювання відстані**

Метод	Переваги	Недоліки
Часовий	1. Можливість визначення відстаней до довільної кількості об'єктів керування 2. Можливість визначення характеру об'єкта керування	1. Розрізнявальна спроможність залежить від тривалості імпульсу 2. Із зменшенням тривалості імпульсу зростає згасання імпульсу
Частотний	1. Можливість визначення відстаней до довільної кількості об'єктів керування 2. Можливість визначення характеру об'єкта керування 3. Висока точність вимірювання	1. Складність технічної реалізації 2. Необхідність забезпечення лінійності модуляції
Фазовий	1. Визначення характеру об'єкта керування 2. Висока точність вимірювання 3. Використання низькочастотних сигналів	1. Відсутність розрізнявальної спроможності 2. Неможливість визначення характеру неоднорідності

**Висновки**

1. В результаті дослідження методів вимірювання дальності для автоматизації процесів керування літальними апаратами виявлено, що об'єкти керування відрізняються між собою та характеризуються великою кількістю різноманітних параметрів, в зв'язку з чим не існує одного універсального методу та засобу для їх виявлення.

2. Аналіз методів вимірювання дальності систем автоматизації процесів керування літальними апаратами показав, що для виявлення цілей використовують електромагнітні поля, завдяки яким отримують інформацію про характеристики досліджуваних об'єктів керування.

3. Для виявлення цілей за допомогою систем автоматизації процесів керування літальними

апаратами, що ґрунтуються на використанні коливальних процесів по первинному інформативному параметру можна виділити наступні методи вимірювання дальності: амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, частотно-фазовий, часовий, резонансний.

### Література

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.
2. Справочник по основам радиолокационной техники / под ред. В.В. Дружинина. – М. : Воениздат, 1987. – 768 с.
3. Теоретические основы радиолокации : учебное пособие для вузов / под ред. Ширмана Я.Д. – М. : Советское радио, 1970. – 560 с.
4. Бакулев П.А. Радиолокационные и радионавигационные системы / П.А. Бакулев, А.А. Сосновский. – М. : Радио и связь, 1994. – 296 с.
5. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев. – М. : Радио и связь, 1989. – 192 с.

### References

1. Spravochnik po radiolokacii / pod red. M. Skolnika. – M. : Sov. radio, 1976. – 456 s.
2. Spravochnik po osnovam radiolokacionnoj tehniki / pod red. V.V. Druzhinina. – M. : Voenizdat, 1987. – 768 s.
3. Teoreticheskie osnovy radiolokacii : uchebnoe posobie dlya vuzov / pod red. Shirmana Ya.D. – M. : Sovetskoe radio, 1970. – 560 s.
4. Bakulev P.A. Radiolokacionnye i radionavigacionnye sistemy / P.A. Bakulev, A.A. Sosnovskij. – M. : Radio i svyaz, 1994. – 296 s.
5. Astanin L.Yu. Osnovy sverhshirokopolosnyh radiolokacionnyh izmerenij / L.Yu. Astanin, A.A. Kostylev. – M. : Radio i svyaz, 1989. – 192 s.

Надійшла / Paper received : 17.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.