

УДК 621.396.96

Д.Г. Васильєв, Є.Л. Казаков

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ПИТАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЦІЛЕЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БАГАТОЧАСТОТНОГО СИГНАЛУ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЛС

*Розглядаються питання, що пов'язані з практичною реалізацією методів визначення ознак розпізнавання по багаточастотному сигналу в РЛС. Оцінюється вплив режиму кругового огляду в РЛС з поімпульсною перебудовою частоти на амплітуду відбитих сигналів, при обробці яких отримуються ознаки розпізнавання. Пропонуються нескладні пристрої, які дозволяють враховувати зміну потенціалу РЛС, нерівномірність амплітудно-частотної характеристики приймача, діаграму спрямованості РЛС, дальність до радіолокаційної цілі, а також здійснювати калібрування трактів.*

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, ознаки розпізнавання, багаточастотний сигнал, радіолокаційна ціль, геометричні характеристики, амплітудні флуктуації, модуляція, потенціал РЛС, калібрування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У сучасній науково-технічній літературі розглядаються питання визначення геометричних характеристик радіолокаційних цілей (РЛЦ) за сигнальною інформацією, що отримується однопозиційними і багатопозиційними РЛС при використанні ними багаточастотних сигналів (БЧС), які можуть бути використані в якості додаткових ознак розпізнавання РЛЦ. Очевидно, що такі чинники, як зміна потенціалу РЛС, вплив діаграми спрямованості, відношення сигнал/шум на вході приймача і інші особливості впливатимуть на отримувани при обробці БЧС ознаки розпізнавання, що надалі може привести до істотного зниження якості розпізнавання РЛЦ. Тому питання практичної реалізації методів отримання ознак розпізнавання РЛЦ складають актуальну науково-технічну проблему.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботах [1 – 3] були розглянуті методи визначення геометричних характеристик РЛЦ при використанні в РЛС некогерентної обробки відбитих БЧС системою рознесення на місцевості РЛС. Проте при цьому не розглядалася можливість практичної реалізації цих методів в різних РЛС з урахуванням впливу різних чинників, що істотно знижують якість розпізнавання РЛЦ.

**Метою статті є** розгляд можливих шляхів модернізації РЛС для практичної реалізації методів визначення геометричних характеристик РЛЦ по БЧС.

### Основний матеріал

Розглянемо вплив часових флуктуацій інтенсивностей відбитих від РЛЦ сигналів в РЛС кругового огляду. У таких РЛС випромінювання сигналів на М частотах може бути одночасним або послідовним. Одночасне випромінювання сигналів різних частот вимагає наявності багатоканальних передавальних і приймальних пристроїв РЛС, що не завжди прийнят-

но. Тому представляє інтерес розгляд випадку, коли випромінювання зондуючих сигналів відбувається з перебудовою частоти від імпульсу до імпульсу. В цьому випадку на спосіб обробки послідовності відбитого БЧС для отримання інформації про геометричні характеристики цілі, що спостерігається, робитиме вплив характер часових амплітудних флуктуацій відбитих сигналів. Цей вплив залежить від співвідношення часу отримання сигналів багаточастотної пачки і часу кореляції амплітудних флуктуацій відбитих сигналів. Амплітудні флуктуації виникають, поперше, в результаті модуляції відбитого сигналу рухомими частинами РЛЦ (турбінами двигунів, повітряними гвинтами, антенами бортових РЛС і тому подібне), по-друге, унаслідок зміни в часі ракурсу цілі щодо лінії візування РЛС. Вплив турбін і компресорів двигунів, що обертаються, виявляється для довжин хвиль коротше 10 – 15 см, максимальна частота модуляції складає декілька кілогерц, тому при типових значеннях частоти проходження імпульсів в РЛС (менше 1 кГц) турбінну модуляцію можна розглядати як слабкорельований адитивний шум. Відношення потужності корисного сигналу і такого шуму при  $\lambda > 10$  см має порядок 20 дБ і більше.

Модуляція, що викликана обертанням повітряних гвинтів, спостерігається практично у всьому діапазоні довжин хвиль РЛС і має порядок десятки-сотні герц. В цьому випадку час кореляції модуляційної складової сигналу виявляється близько декількох мілісекунд. Якщо час формування некогерентного частотномодульованого сигналу порівняний з цією величиною, то можливе переплутування, наприклад, вертольотів з літаками великих розмірів (бомбардувальниками). У останньому випадку можна використовувати відмінність в швидкості польоту для усунення похибок такого роду. Модуляція сигналу може бути викликана також обертанням антен РЛС і перш за все при огляді передньої півсфери РЛЦ. Максимальна частота обер-

тання таких антен може досягати 10 Гц, а розміри 1,5 м. Час кореляції сигналу, відбитого від антени, що обертається, обмежений знизу величиною  $\lambda/100$  секунд, якщо довжина хвилі виражена в сантиметрах. Перспективні американські літаки типу В-1, F-14 та інші оснащені РЛС переднього огляду з фазованою антенною решіткою, яка нерухома або обертається (сканує) із значно меншою кутовою швидкістю.

Друга група чинників, що викликають часові флуктуації сигналу, пов'язана із зміною ракурсу РЛЦ, який містить дві змінні складові. Перша обумовлена регулярним поступальним рухом, а друга – випадковими коливаннями РЛЦ навколо центру мас (рисканням), викликаними турбулентністю атмосфери. Виконавши елементарні розрахунки, можна показати, що оцінка знизу для часу кореляції флуктуацій сигналу, пов'язаних з рухом РЛЦ, визначається виразом

$$\tau > \frac{\varphi_{0,5}}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

де  $\varphi_{0,5}$  – ширина пелюстки діаграми, зворотного вторинного відбиття РЛЦ на рівні 0,5;  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – максимальні кутові швидкості зміни ракурсу РЛЦ, що спостерігається, за рахунок поступального руху і рискання відповідно.

Значення  $\alpha_1$  залежить від швидкості РЛЦ (V), дальності до неї (R) та ракурсу цієї цілі  $\beta$ :

$$\alpha_1 = \frac{V \sin \beta}{R}.$$

За наявними експериментальними даними в якості оцінки параметра  $\alpha_2$  для важких літаків можна прийняти величину  $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$  рад/с. Ширина пелюстка  $\varphi_{0,5}$  пов'язана з довжиною хвилі РЛС і розміром РЛЦ (L) співвідношенням  $\varphi_{0,5} \geq \lambda / 2L$ .

Якщо довжина хвилі виражена в сантиметрах, то для стратегічного бомбардувальника ( $L = 50$  м) при  $R \geq 100$  км,  $V \leq 300$  м/с,  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , приведена вище оцінка має наступний вигляд

$$\tau > \lambda / 50, \text{ с.}$$

Таким чином, при довжині хвилі  $\lambda \approx 10$  см можна вважати, що час кореляції сигналів, відбитих від реактивних літаків, складає  $\tau_k \approx 0,1$  с. Наявність антени, що обертається, бортової РЛС мало позначається на часі кореляції.

Якщо автокореляційну функцію флуктуацій амплітуд відбитих сигналів на одній частоті з урахуванням руху апроксимувати функцією типу  $\sin x/x$ , той вираз для часового коефіцієнта кореляції при  $\tau_k = 0,1$  с набере вигляду

$$\rho \tau = \sin 10\pi\tau / 10\pi\tau. \quad (1)$$

Проведені розрахунки показують, що при здійсненні обертання антени РЛС кругового огляду із швидкістю 6 об/мін, частоті зондування 350 Гц і ши-

рині діаграми спрямованості антени  $1^\circ$  приймальний пристрій може прийняти пачку відбитих від РЛЦ сигналів, що складаються з 10 імпульсів різних частот, за час  $t_{\text{пр}} = 0,028$  с. Підставивши цей час у вираз (1), набудемо значення коефіцієнта кореляції між амплітудами відбитих сигналів на одній з частот першого і десятого зондування  $\rho(0,023) = 0,875$ . Дані розрахунки показують, що амплітуди відбитих сигналів при перебудові частоти випромінювання від імпульсу до імпульсу з частотою 350 Гц піддаються 13% додатковій модуляції, яка виникає за рахунок руху РЛЦ.

Отже, при практичній реалізації пристроїв визначення ознак розпізнавання РЛЦ необхідно врахувати наступне:

а) на пристрої, що визначають ознаки розпізнавання, відбиті сигнали на різних частотах повинні поступати одночасно і лише від однієї РЛЦ, тобто необхідно здійснювати стробування відеотракту приймача РЛС по дальності (часу);

б) вплив діаграми спрямованості антени РЛС на амплітуду прийнятих на різних частотах сигналів;

в) залежність потужності відбитих сигналів від дальності до РЛЦ;

г) зміна потенціалу РЛС за часом;

д) оскільки імпульси на будь-якій з випромінюваних частот можуть опинитися на початку відбитої від РЛЦ пачки імпульсів, то виникає необхідність прив'язки значень амплітуд прийнятих сигналів до програми отримуваних частот перед надходженням їх на пристрої визначення ознаки розпізнавання.

На рис. 1 приведена структурна схема одного з можливих пристроїв урахування перерахованих чинників і особливостей РЛС перед введенням значень амплітуд відбитих сигналів в пристрої визначення ознак розпізнавання.

Дана структурна схема містить декілька різних схем. Розглянемо послідовно роботу кожній з них. Відбита від РЛЦ багаточастотна пачка радіоімпульсів поступає в одноканальний приймач з перестроюваним гетеродином відповідно до частот сигналів, що випромінюють, детектується і поступає в блок вимірювання дальності до РЛЦ і формування строба. Цей блок формує на зміряній дальності (часу з моменту випромінювання зондуючого сигналу) строб такої тривалості, щоб в нього потрапив сигнал, відбитий тільки від однієї РЛЦ.

Далі імпульси відбитої пачки затримуються на час формування строба, проходять стробований каскад і поступають на входи ключів-підсилювачів схеми урахування дальності до РЛЦ. У неї входять дешифратор 1 і згаданий вище блок вимірювання дальності до РЛЦ. У блоці вимірювання дальності формується двійковий код дальності, який поступає через суматор на дешифратор 1. Дешифратор управляє включенням відповідних коду дальності ключів-підсилювачів 1.

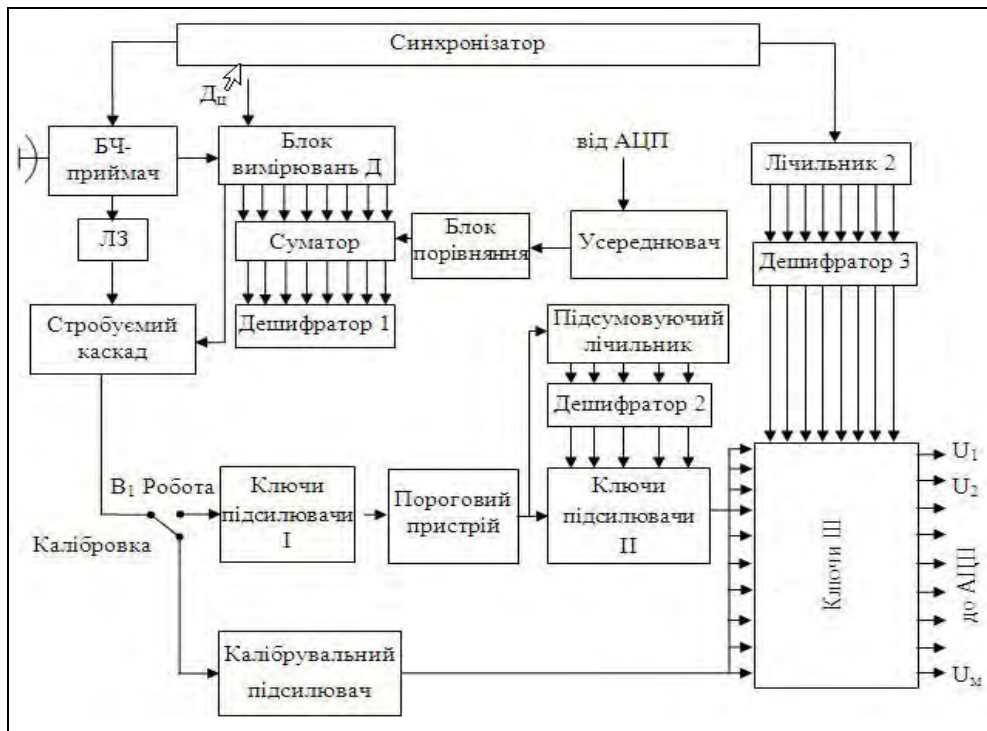


Рис. 1 Структурна схема пристрою урахування впливу особливостей РЛС

Дослідження ефективності розпізнавання деяких типів РЛЦ [4], зокрема, показали, що найбільш оптимальними значеннями відношення сигнал/шум на вході приймача для вирішення задачі розпізнавання є величини (20...25) дБ. Тому природно припустити, що амплітуду відбитого від РЛЦ сигналу потрібно змінити так, щоб вона відповідала амплітуді відбитого сигналу з дальності  $R$  (рис. 2), на якій відбиття сигнал/шум дорівнює (20...25) дБ. Ця дальність може бути або обчислена при відомих характеристиках РЛС, або знайдена експериментальним шляхом. Оскільки амплітуда відбитого сигналу зворотно пропорційна квадрату відстані до РЛЦ, то коефіцієнт посилення ключів-підсилювачів слід вибирати пропорційно цій залежності.

На рис. 2 суцільною і пунктирною лініями приведені відповідно якісні залежності значень коефіцієнтів посилення підсилювачів і амплітуди відбитого сигналу від дальності до РЛЦ, що спостерігається.

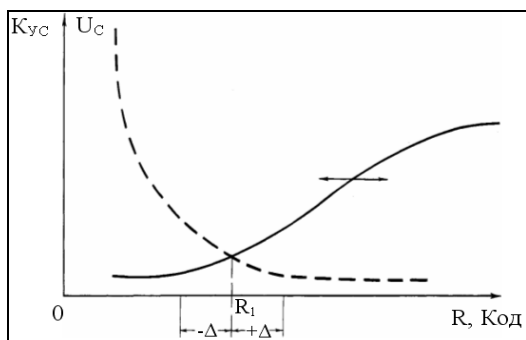


Рис. 2. Залежності значень коефіцієнтів підсилення амплітуди відбитого сигналу від дальності до РЛЦ

Розглянемо роботу схеми урахування змін потенціалу РЛС і методику калібрування РЛС.

Оскільки відношення сигнал/шум, що дорівнює (20...25) дБ, досягається, в основному, на середніх дальностях, де значення коефіцієнтів ключів-підсилювачів в схемі обліку дальності до РЛЦ міняється практично лінійно, той вплив зміни потенціалу РЛС на амплітуди відбитих сигналів можна врахувати за допомогою схеми, що складається з усереднювача, блоку порівняння і суматора (1).

Основна зміна потенціалу РЛС відбувається за рахунок зміни чутливості приймального пристрою. Тому калібрування РЛС в режимі "Робота" доцільно проводити по калібрувальному сигналу, що вводиться в розкриття антени. Для обліку довготривалих змін потенціалу РЛС за рахунок зміни потужності передавального пристрою, погодних умов та іншого необхідно здійснювати налаштування схеми урахування змін потенціалу, що описується.

Порядок налаштування (калібрування) і робота схеми полягає в наступному. Періодично, під час регламентних робіт або із зміною умов розповсюдження радіохвиль антена РЛС встановлюється максимумом діаграми спрямованості на який-небудь відомий місцевий відбивач або вежу зі встановленим на ній еталоном (куля, кутковий відбивач). У схемі встановлюється режим калібрування. При цьому сигнали, відбиті від еталону, на всіх частотах проходять через блок ключів-підсилювачів I і інші блоки з однаковим для подібних налаштувань коефіцієнтом посилення на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Коди амплітуд поступають на усере-

дновач і блоці порівняння, де запам'ятовується двійковий код усередненої по частоті амплітуди сигналу, відбитого від еталону. При цьому блок вимірювання дальності формує код „калібрувальної дальності”, тобто включає один з ключів-підсилювачів 1, коефіцієнт посилення якого підбирається таким, щоб сигнали не обмежувалися.

У режимі “Робота” підстроювання схеми проводиться таким чином. Після випромінювання зондуєчого сигналу (на малих дальностях) в схемі включається режим підстроювання. При цьому в розкритті антени приймального пристрою вводиться контрольний сигнал на тій же частоті, що і зондуєчий, каліброваної потужності. Код амплітуди контрольного сигналу, що поступив з АЦП, порівнюється в блоці порівняння з кодом усередненої амплітуди сигналу, відбитого від еталону, який там зберігався. Різниця цих кодів зі своїм знаком надходить в суматор як поправка до коду дальності. Потім включається режим РЛС “Робота” і поправка до коду дальності зберігатиметься до приходу контрольного сигналу на черговій частоті. З рис. 2 видно, що така поправка до коду дальності як би „зрушує” криву залежності коефіцієнтів підсилення ключів-підсилювачів 1 управо або вліво при збільшенні або зменшенні потенціалу РЛС від первинного. Очевидно, що така схема здійснює також коректування амплітудно-частотної характеристики приймального тракту РЛС.

Розглянемо далі роботу схеми урахування впливу діаграми спрямованості антени на амплітуди відбитих сигналів в режимі кругового огляду РЛС. Заздалегідь відмітимо, що на малих дальностях до РЛЦ пачка відбитих сигналів матиме число імпульсів  $M > 10$ , оскільки відбиті сигнали прийматимуться відповідно до діаграми спрямованості по рівню  $0,2 P$ , а не  $0,5 P$ , як це передбачалося раніше. Тому доцільно на вході схеми обліку діаграми спрямованості встановити пороговий пристрій. Таким чином, до складу схеми, що описується, входить пороговий пристрій, блок ключів-підсилювачів 2, дешифратор і підсумовуючий лічильник, який формує двійковий код номера імпульсу в пачці. Код поступає на дешифратор 2, який відкриває по черзі ключі-підсилювачі 2, коефіцієнти посилення яких встановлюються пропорційно значенням огинаючої пачки прийнятих сигналів. Огинаючі пачки можна апроксимувати функцією типу  $\sin x/x$ .

На рис. 3 якісно приведені залежності огинаючої пачки відбитих БЧС при різних дальностях до РЛЦ і пунктирною лінією приведена залежність значень коефіцієнтів підсилення ключів-підсилювачів 2 від номера імпульсу в пачці.

Схема розділення каналів не відрізняється по своєму складу від попередньої, немає тільки порогового пристрою. Схема працює таким чином. З синхронізатора поступають імпульси на лічильник 2 з частотою зондування РЛС, при цьому в лічильнику формується код номера частоти, що випромі-

нюється. Обнуління лічильника здійснюється імпульсом запуску РЛС на першій частоті. Даний код номера частоти імпульсу, що випромінюється, поступає на дешифратор, який відкриває відповідний коду ключ.

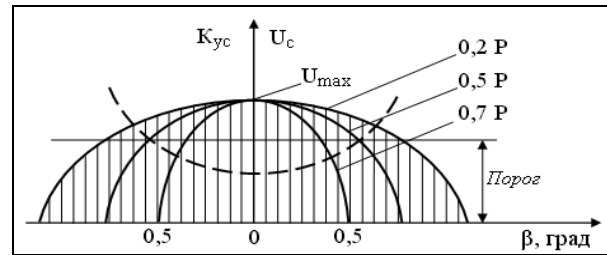


Рис. 3. Залежності огинаючої пачки БЧС від дальності і коефіцієнтів підсилення від номера імпульсу в пачці

Таким чином, при випромінюванні імпульсів з послідовно змінною частотою заповнення, буде відкритий ключ номера частоти, на якій випромінюється зондуєчий імпульс. Виходи ключів можуть бути підключені до АЦП і пристрою визначення ознаки розпізнавання.

## Висновки

За допомогою запропонованих схем можна врахувати перераховані вище чинники і особливості РЛС, які роблять істотний вплив на амплітуди відбитого БЧС.

Очевидно, що при роботі в різних режимах і для різних РЛС можуть не знадобитися деякі з приведених схем. Так, наприклад, при роботі РЛС в режимі супроводження РЛЦ відпадає необхідність враховувати діаграму спрямованості РЛС. Також необхідно відзначити, що необхідність кожної з розглянутих схем і доцільність їх використання саме у такому вигляді треба розглядати за наявності конкретних характеристик РЛС.

## Список літератури

1. Казаков Е.Л. Радиолокационные признаки распознавания при многопозиционной локации / Е.Л. Казаков и др.; под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: АСЦ, 2005. – 188 с.
2. Казаков Е.Л. Метод определения геометрических характеристик радиолокационных целей при использовании многочастотных сигналов в системе разнесенных РЛС / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2(7). – С. 74-79.
3. Казаков Е.Л. Распознавание воздушных целей в некогерентному многочастотному сигналу с учетом поляризации в разных диапазонах длин волн / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков; под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: КП “Типография № 13”, 2009. – 165 с.
4. Казаков Е.Л. и др. Распознавание целей при многочастотной радиолокации / под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: МОУ, ОНИИ ВС, 2007. – 188 с.

Надійшла до редколегії 10.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РЛС**

Д.Г. Васильев, Е.Л. Казаков

*Рассматриваются вопросы, связанные с практической реализацией методов определения признаков распознавания по многочастотному сигналу в РЛС. Оценивается влияние режима кругового обзора в РЛС с поимпульсной перестройкой частоты на амплитуду отраженных сигналов, при обработке которых получают признаки распознавания. Предлагаются несложные устройства, позволяющие учитывать изменение потенциала РЛС, неравномерность амплитудно-частотной характеристики приемника, диаграмму направленности РЛС, дальность до радиолокационной цели, а также осуществлять калибровку трактов.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, признаки распознавания, многочастотный сигнал, радиолокационная цель, геометрические характеристики, амплитудные флуктуации, модуляция, потенциал РЛС, калибровка.

**QUESTIONS OF REALIZATION METHODS OF DETERMINATION GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF RADAR TARGETS AT USE MULTIFREQUENCY SIGNAL CONSIDERING RADARS FEATURES**

D.G. Vasiliev, E.L. Kazakov

*Related with practical realization methods of determination recognition attributes on multifrequency signal in radars questions are examined. Influence of the round-looking scan mode in radar with alteration of frequency from impulse to impulse on amplitude of the reflected signals at treatment of which the recognition attributes turn out is received. Simple devices allowing to considering the change of radar potential, unevenness of receiver amplitude-frequency characteristic, orientation diagram of radar, distance to the radar target are offered, and also to carry out highways calibration.*

**Keywords:** radar, recognition attributes, multifrequency signal, radar target, geometrical characteristics, amplitude fluctuations, modulation, radar potential, calibration.