УДК 621.396.6:621.317

Г. Г. Смаглюк, Г. Д. Братченко, д.т.н., **І. В. Папач**

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

ОЦІНКА ЯКОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В УМОВАХ ВПЛИВУ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Методом імітаційного моделювання оцінюється якість розпізнавання типів повітряних цілей за їх радіолокаційними дальнісними портретами в умовах впливу дестабілізуючих факторів: шумових завад; фазових гармонічних спотворень закону модуляції широкосмугового зондувального сигналу; не урахування широкосмуговості антенної решітки. Результати моделювання отримані для носових та бічних ракурсів спостереження цілей. Якість розпізнавання повітряних цілей на бічних ракурсах значно погіршується, що робить доцільним застосування методу інверсного синтезування апертури для отримання двовимірних і тривимірних радіозображень.

Ключові слова: *радіолокаційний дальнісний портрет, дестабілізуючий фактор, антенна решітка, широкосмуговий сигнал, радіолокаційне розпізнавання, інверсне синтезування апертури.*

Вступ

У випадку відсутності інформації радіолокаційного розпізнавання («свій-чужий») може бути використана додаткова інформація про належність об’єкта до певного класу (типу), яка отримується методами радіолокаційного розпізнавання на основі сукупності сигнальних, траєкторних та поведінкових ознак [1, 2]. Сигнальні ознаки розпізнавання несуть інформацію про рухомі елементи цілі та її форму. Якість розпізнавання при цьому залежить від стійкості ознак в умовах впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, що потребує додаткового дослідження.

Аналіз публікацій

Одними з найбільш інформативних є сигнальні ознаки, які передають інформацію про форму об’єкта, наприклад, радіолокаційний дальнісний портрет (РЛДП), двовимірні та тривимірні радіозображення (РЗ) [2-5]. Для отримання таких ознак застосовуються широкосмугові сигнали (ШСС), які забезпечують розділення елементів цілей за дальністю в напрямку лінії візування. Серед дестабілізуючих факторів, які впливають на форму РЛДП та РЗ, можна виділити: зміни ракурсу спостереження, випадкові зміни орієнтації цілі та фактори, які спотворюють сигнал в процесі його формування і обробки [6]. Вплив ракурсу спостереження та випадкових змін руху цілей та відношення сигнал-шум на якість розпізнавання повітряних цілей за їх РЛДП та частково досліджено в [2, 3, 7, 8]. Вплив спотворень зондувального сигналу, не урахування широкосмуговості антенної решітки (АР), не ідентичності основного та каналів АР адаптивної радіотехнічної системи (РТС) в умовах впливу шумових завад було розглянуто в [9, 10], де аналізувалась залежність зниження рівня взаємної кореляції РЛДП з еталонними в залежності від ступеня спотворень сигналу. **Метою статті** є оцінка впливу цих спотворень на якість розпізнавання повітряних цілей на носових і бічних ракурсах спостереження в РТС з АР.

Викладання основного матеріалу

Залежності повної ймовірності хибного розпізнавання повітряних цілей для різних алфавітів класів від відношення сигнал-шум при широкосмуговому зондуванні наведені, наприклад, в [2, 3]. В [3] також представлені подібні залежності для інформативності алфавітів класів. Всі вони отримані методом математичного моделювання розпізнавання цілей. Ґрунтуючись на представлених в [10] теоретичних розрахунках і залежностях в [2, 3], існує можливість прогнозувати якість розпізнавання повітряних цілей в умовах впливу зовнішніх шумових завад і внутрішньосистемних дестабілізуючих факторів в адаптивній РТС в сталому режимі. В той же час, такий підхід не може бути використаний у разі спотворень зондувального сигналу (ЗС), а також інших факторів, які ведуть до спотворень форми РЛДП, наприклад, нехтування широкосмуговістю АР.

З урахуванням складності задачі теоретичної оцінки впливу дестабілізуючих факторів на якість розпізнавання повітряних цілей пропонується застосовувати метод імітаційного моделювання. Структурна схема математичної моделі для дослідження впливу дестабілізуючих факторів на якість розпізнавання об’єктів в РЛС з адаптивною АР була представлена в [9].

Імітування розпізнавання виконувалось для шести типів цілей: великого розміру (літаки Ту-

16, B-52, B-1B), середнього розміру (літаки МіГ-29, F-15) та малого розміру (крилата ракета ALCM), електродинамічні моделей яких виконані за методом простіших компонентів [2, 3]. Використовувалась єдина ознака розпізнавання – кореляційна сума РЛДП з еталонними портретами [2]. Еталони були отримані за результатами індивідуалізованого навчання для кожної цілі в секторах ракурсів – 10°…$+10^{o}$ та 80°…100° за методикою, яка описана в [3]. Навчальні вибірки з 1100 портретів для кожного типу цілі отримувались за допомогою програми Radar Target Backscattering Simulation (RTBS) [11] при наступних параметрах руху цілі: висота – 8 км, дальність до цілі – 100 км, швидкість цілі (800 – 1100 км/год), за умов впливу на ціль в процесі польоту турбулентності ясної погоди. Окремі технічні характеристики РЛС: довжина хвилі – 13 см; зондувальний лінійно-частотно-модульований (ЛЧМ) радіоімпульс з прямокутною обвідною (тривалість імпульсу 13,65 мкс, девіація частоти 150 МГц); обробка сигналу включала узгоджену фільтрацію та додаткове застосування фільтра Хеммінга. З метою отримання еталонних РЛДП виконувалось індивідуалізоване навчання за методикою описаною в [3]. За результатами навчання при середньому відношенні сигнал-шум 30 дБ на один портрет для кожного з типів цілей отримано по 5 еталонних РЛДП. Для цього на першій ітерації знаходилась кореляційна сума кожного з портретів навчальної вибірки з прямокутними портретами різної довжини, нормованими за енергією до одиниці. На наступній ітерації застосовувались нормовані усереднені портрети отримані за сукупностями РЛДП, які найкращим чином корелювали з відповідними прямокутними еталонами. Кількість ітерацій в процедурі навчання дорівнювала трьом. Отримані еталонні портрети в подальшому застосовувались для розпізнавання тих же типів цілей, але за портретами отриманими в дещо відмінних умовах польоту цілей: турбулентність купчастих хмар; висота польоту змінювалась в межах 2 км порівняно з умовами навчання; політ цілей задавався неперервними прямолінійними траєкторіями, протягом польоту ракурс цілі змінювався в межах 10°...15°. Розпізнавання цілей виконується за максимумом кореляційної суми з еталонами.

Якість розпізнавання оцінювалась за повною ймовірністю хибного розпізнавання [2]

$$P_{\text{хиб}} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(1 - P_{ii}\right),$$

де M – кількість класів (типів) цілей, P_{ii} – умовна ймовірність вірного розпізнавання цілі i-го класу.

Для оцінки повної ймовірності хибного розпізнавання кількість РЛДП складала $N = 1100$. Вони імітувались за час польоту цілі 110 с відповідно на носових (-10°…$+10^{o}$) та бічних (80°…100°) ракурсах спостереження. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) оцінки $\hat{P}_{\text{хиб}}$ при кількості незалежних прогонів моделі N для кожного типу цілі складе [12]

$$\hat{\sigma}_{P_{\text{хиб}}} = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{M}\hat{P}_{ii}\left(1 - \hat{P}_{ii}\right)},$$

де $\hat{P}_{ii}$ – оцінка умовної ймовірності вірного розпізнавання цілі i-го класу (частість події).

Для вказаних вище умов спостереження в роботі окремо досліджується вплив на якість розпізнавання цілей наступних дестабілізуючих факторів: шумових завад (суміші власних шумів приймального тракту та не скомпенсованих зовнішніх шумових завад), як це пропонувалось в [10] стосовно адаптивної РТС з АР і основним каналом за умов порушення ідентичності каналів; фазових гармонічних спотворень закону модуляції ЗС; не урахування широкосмуговості адаптивної АР при повороті променя на значний кут від нормалі. На рис. 1 представлені залежності повної ймовірності хибного розпізнавання типів цілей на носових та бічних ракурсах спостереження, які є подібними до представлених в [2, 3].

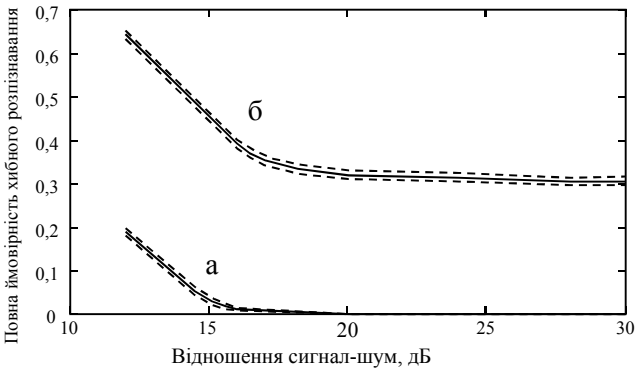

Рисунок 1 – Залежність повної ймовірності хибного розпізнавання цілей за їх РЛДП від відношення сигнал-шум: а) на носових ракурсах; б) на бічних ракурсах

Пунктирними лініями на графіках показано довірчий інтервал $\left(-2\hat{\sigma}_{P_{\text{хиб}}}, 2\hat{\sigma}_{P_{\text{хиб}}}\right)$, в який оцінка $\hat{P}_{\text{хиб}}$ потрапляє (у припущенні нормального закону її розподілу) з ймовірністю 0,95. При

зменшенні відношення сигнал-шум спостерігається зниження ймовірності хибного розпізнавання. Ймовірність хибних рішень на бічних ракурсах для повітряних цілей є значно більшою, ніж на носових за однакових умов навчання та розпізнавання.

Порівняння цих залежностей з графіками зміни коефіцієнтів взаємної кореляції окремих РЛДП літаків ТУ-16, В1-В та МіГ-29 з неспотвореними портретами цих типів цілей на носових ракурсах, наведеними в [10], дозволяє дати якісну оцінку відповідності повної ймовірності хибного розпізнавання певному рівню взаємної кореляції портретів.

Подальше дослідження пов'язане з оцінкою впливу паразитної фазової модуляції при генеруванні ЛЧМ радіоімпульсу. На рис. 2 наведені залежності повної ймовірності хибного розпізнавання при спотворенні закону модуляції паразитною гармонічною фазовою модуляцією зі змінним індексом M_φ=0...2. Середнє відношення сигнал-шум на один портрет при цьому задавалось рівним 20 дБ. При збільшенні індексу фазової модуляції та, відповідно, ступеня спотворення форми сигналу суттєво зростає ймовірність прийняття хибних рішень.

Оцінка впливу не урахування широкосмуговості АР розглянута для умов моделювання, наведених в [9], коли кількість елементів лінійної решітки дорівнювала 50, а коефіцієнт широкосмуговості складав 1,84. Порівнювались повні ймовірності хибних рішень для випадків повороту променя АР відносно нормалі на $\theta=0^o$ та $\theta=85^o$. Відношення сигнал-шум на виході АР при $\theta=0^o$ складало 20 дБ, ймовірність хибного рішення про тип цілі склала 0,0002 (єдина помилка для цілі типу Міг-29). При повороті променя АР на кут $\theta=85^o$, якщо не враховувати відмінність затримки обвідних відбитих сигналів в каналах АР, повна ймовірність хибних рішень зростає до 0,048.

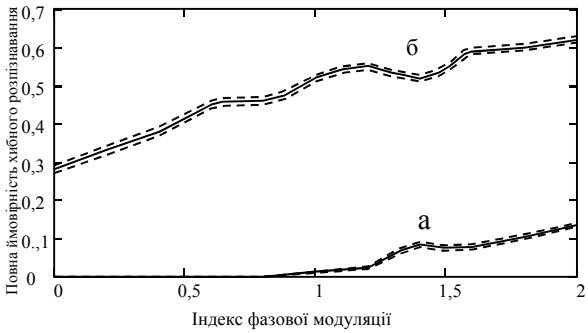

Рисунок 2 – Залежність повної ймовірності хибного розпізнавання цілей за їх РЛДП від рівня фазових гармонічних спотворень ЗС: а) на носових ракурсах; б) на бічних ракурсах

Висновки

Отримані залежності повної ймовірності хибного розпізнавання ілюструють можливість прогнозування ступеня зниження якості розпізнавання типів повітряних цілей в залежності від ракурсу спостереження та впливу дестабілізуючих факторів. За результатами моделювання за розглянутих вище умов повна ймовірність хибного розпізнавання зростає: при зниженні відношення сигнал-шум згідно з представленими залежностями, що може бути викликано зниженням ефективності придушення зовнішніх шумових завад в РТС з адаптивною АР; при гармонічному фазовому спотворенні зондувального ЛЧМ сигналу від 0,012 до 0,13 на носових ракурсах та від 0,25 до 0,6 – на бічних ракурсах при зміні індексу паразитної гармонічної фазової модуляції M_φ від 0 до 2; при повороті променя АР від $\theta=0^o$ до $\theta=85^o$ від 0,0002 до 0,048, якщо не враховується широкосмуговість АР.

Якість розпізнавання цілей за їх РЛДП на бічних ракурсах є значно нижчою, ніж на носових ракурсах. Це викликано можливим впливом ефекту затінювання частини повітряної цілі, значного рівня дзеркально відбитого сигналу від фюзеляжу цілі, тому необхідно додатково застосовувати й інші ознаки розпізнавання. Для покращення якості розпізнавання на бічних ракурсах також доцільно застосовувати двовимірні і тривимірні радіозображення, які можуть бути отримані методом інверсного синтезування апертури. В умовах впливу різного роду дестабілізуючих факторів це є доволі складною задачею, що потребує подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А. Л. Горелик, Ю. Л. Барабаш, О. В. Кривошеев, С. С. Эпштейн; Под ред. А. Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.

2. Ширман Я. Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 3-63.

3. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking / Y. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. P. Leshchenko, V. M. Orlenko, S. Y. Sedyshev, O. I. Sukharevskiy / Y.D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 p.

4. Chen Victor C. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms, and Applications / Victor C. Chen, Marco Martorella. – SciTech Publishing, 2014. – 304 p.

5. C. Liu, X. Gao, W. Jiang, and X. Li. Interferometric ISAR Three-dimensional Imaging using one Antenna. – Progress In Electromagnetics Research M, 2011. – Vol. 21. – P. 33-45.

6. Братченко Г. Д. Классификация дестабилизирующих воздействий в процессе радио-локационного распознавания / Г. Д. Братченко, В. В. Скачков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків, 2010. – Вип. 4(26). – С. 64-67.

7. Братченко Г. Д. Математичне моделювання розпізнавання повітряних цілей по радіолокаційних портретах на бічних ракурсах / Г. Д. Братченко, О. О. Бондаренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків, 2007. – Вип. 2(14). – С. 49 – 51.

8. Братченко Г. Д. Математичне моделювання розпізнавання повітряних цілей по двовимірних радіозображеннях на бічних ракурсах / Г. Д. Братченко // Системи обробки інформації. – Харків, 2008. – Вип. 3(70). – С. 18-21.

9. Братченко Г. Д. Моделювання впливу дестабілізуючих факторів на форму дальнісних портретів в радіолокаційних системах з антенними решітками / Г. Д. Братченко, Г. Г. Смаглюк // Збірник наукових праць ОДАТРЯ. – Одеса, 2015. – Вип. 1(6). – С. 119–125.

10. Скачков В. В. Оценка влияния внутрисистемных возмущений на качество решения информационных задач в адаптивной радиотехнической системе / В. В. Скачков, Г. Д. Братченко, Г. Г. Смаглюк, Г. С. Бондаренко // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – Одеса, 2015. – Вип. 2(7). – С. 131-134.

11.Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Yu, Shirman Y. D. – Boston–London: Artech House, 2002. – 71 p.

12. Моделирование в радиолокации / А. И. Леонов, В. Н. Васенев, Ю. И. Гайдуков и др.; под ред. А. И. Леонова. – М.: Сов. радио, 1979. – 264 с.

Надійшла до редакції 22.05.2016

Рецензент: д.т.н., доцент Боряк К. Ф., Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

Г. Г. Смаглюк, **Г. Д. Братченко**, д.т.н., **И. В. Папач**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Методом имитационного моделирования оценивается качество распознавания типов воздушных целей по их радиолокационным дальностным портретам в условиях воздействия дестабилизирующих факторов: шумовых помех; фазовых гармонических искажений закона модуляции широкополосного зондирующего сигнала; не учета широкополосности антенной решетки. Результаты моделирования получены для носовых и боковых ракурсов наблюдения целей. Качество распознавания воздушных целей на боковых ракурсах значительно ухудшается, что делает целесообразным применение метода инверсной синтезирования апертуры для получения двумерных и трехмерных радиоизображений.

Ключевые слова: *радиолокационный дальностный портрет, дестабилизирующий фактор, антенная решетка, широкополосный сигнал, радиолокационное распознавание, инверсное синтезирование апертуры.*

G. G. Smagluk, H. D. Bratchenko, DSc, **I. V. Papach**

EVALUATION OF AIR TARGETS QUALITY RADAR RECOGNITION IN CONDITIONS OF DESTABILIZING FACTORS

The quality of air target type recognition by their radar profiles under the influence of destabilizing factors (noise jamming, harmonic distortion of phase modulation of broadband probing signal, not taking into account bandwidth of antenna array) by simulation modeling is estimated. The simulation results for target surveillance on nose and side angles are obtained. Quality of recognition of air targets on side angles much worse and using method of inverse aperture synthesis to produce two-dimensional and three-dimensional radar images is appropriate.

Keywords: *radar profile, destabilizing factor, antenna array, broadband signal, radar recognition, inverse synthetic aperture.*