

УДК 621.396.96

В.М. Орленко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОД ОТРИМАННЯ ДВОВИМІРНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛІТАКІВ НА ОСНОВІ ЧАСОВО-ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАБОРА

*Автоматичне радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів за ступенем небезпеки та селекція хибних та відволікаючих цілей стають дедалі актуальнішими при створенні автоматизованих систем управління Повітряними Силами. При цьому двовимірні радіозображення можуть використовуватися як для автоматичного розпізнавання, так і для контролю збоку людини-оператора за процесом розпізнавання у складних ситуаціях. В статті розробляється метод отримання двовимірних радіозображень на основі часово-частотного перетворення Габора. При цьому замість поодиноких радіозображень поганої якості отримуються послідовності радіозображень, якість яких може суттєво поліпшуватися. За допомогою розробленого методу аналізуються двовимірні радіозображення літака Цесна-172, отримані на основі експериментальних даних.*

**Ключові слова:** радіолокаційне розпізнавання, інверсний синтез апертури антени, радіозображення, ширококутовий радіолокаційний сигнал.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розробка методів класифікації повітряних об'єктів за ступенем небезпеки та селекції хибних цілей-пасток є дуже актуальною задачею при формуванні вимог щодо перспективних радіолокаційних та вогневих засобів Повітряних Сил Збройних Сил України.

На сьогодні існує велика кількість методів класифікації (розпізнавання) повітряних об'єктів за допомогою радіолокаторів, які можуть використовувати звичайні вузькосмугові або ширококутові зондувальні сигнали. Але надійне розпізнавання широкої номенклатури повітряних об'єктів, серед яких як реальні (пілотовані та беспілотні) так й хибні цілі, можливе тільки за рахунок використання ширококутових сигналів [1]. Як і в [1] під ширококутовими ми розуміємо сигнали, які забезпечують розділення окремих елементів повітряних об'єктів за радіальною дальністю та дозволяють отримувати одновимірні радіолокаційні дальнісні портрети.

Двовимірні радіозображення містять інформацію про просторове розташування характерних для кожної цілі локальних центрів розсіювання. Це робить можливим надійне радіолокаційне розпізнавання типів повітряних об'єктів з метою їх класифікації за ступенем небезпеки, а для також селекції хибних та відволікаючих цілей.

Останнє є особливо актуальним та необхідним при створенні автоматизованих систем управління військами та систем підтримки прийняття рішень командирами різних ланок.

Слід зауважити, що для здійснення автоматичного радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей не обов'язково доходити до отримання двовимірних радіозображень. Але для надання можливос-

ті оператору радіолокаційної станції (РЛС) контролю за результатами класифікації найбільш підходять саме такі зображення.

Можливість отримання двовимірних радіозображень була вперше продемонстрована Стайнбергом [2] у 1988 році. З того часу з'явилась дуже велика кількість робіт на цю тему. Результати ж практичного впровадження їх у військову техніку у відкритому друку практично відсутні. Але сучасні військові радіолокатори стають ширококутовими та починають використовувати режим синтезу апертури як один з основних режимів. Прикладом цього є ширококутова бортова РЛС AN/APG-68, наступник якої встановлюється на літак п'ятого покоління F-22 Raptor [3]. Це свідчить про активні зусилля у цьому напрямку у світі.

Отримання якісних двовимірних радіозображень не є простою задачею, оскільки в процесі радіолокаційного спостереження за повітряними об'єктами відбиті ширококутові сигнали зазнають впливу дуже великої кількості випадкових факторів, основним серед яких є рух повітряних об'єктів у просторі. Для вивчення впливу цих випадкових факторів у монографії [4] пропонувалося використовувати часово-частотні методи замість перетворення Фур'є.

**Мета статті.** У цій статті розробляється методика отримання двовимірних радіозображень з використанням часово-частотного перетворення Габора, як найпростішого з існуючих часово-частотних перетворень. З використанням розробленої методики аналізуються двовимірні радіозображення літака Цесна-172, отримані на основі експериментальних записів ширококутових відбитих сигналів.

Експеримент було проведено у 2006 році у Чунгнамському Національному університеті, Республіка Корея. Записи відбитих сигналів було люб'язно нада-

но під час співпраці Чунгнамського національного університету з Харківським Національним університетом радіоелектроніки у 2007-2008 роках. У експерименті літак здійснював прольот на невеликій відстані від експериментальної ширококугової РЛС.

### Короткий опис умов експерименту

Результати експерименту з ширококугового зондування літака було отримано у вигляді файлу, який містив:

- необроблені записи дискретних відліків відбитих сигналів;
- поточний час зондування;
- несуча частота зондувального сигналу;
- час затримки опорної напруги в системі обробки з повною демодуляцією.

Окремо було отримано файл з відеозаписом польоту який містив дані про положення літака у просторі (за даними бортової GPS).

Обробка файлу відеозапису дозволила відтворити схему експерименту, тобто приблизні кути орієнтації літака під час його опромінення. Траєкторія літака показана на рис. 1 в системі координат радіолокатору.

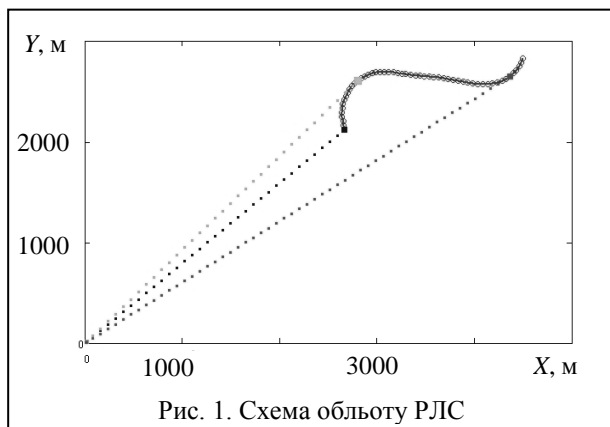


Рис. 1. Схема обльоту РЛС

Видно, що траєкторія містить три основні відрізки. На протяжні перших 20 секунд кут ракурсу зростає, що відповідає поступовому розвороту за часовою стрілкою. Перехід через точку  $360^\circ$  означає поворот літака хвостом до радіолокатору. Протягом наступних 20 секунд літак здійснює прямолінійний політ з практично постійним ракурсом відносно РЛС. На останніх секундах польоту (біля 7 секунд запису) літак здійснює розворот у зворотному напрямку проти часової стрілки. З точки зору отримання радіозображень літака першій та третій відрізки траєкторії є сприятливими, а другий несприятливим, оскільки немає розвороту літака на значний кут протягом тривалого часу.

Аналіз траєкторії дозволив обчислити приблизні ракурси літака під час руху за траєкторією (рис. 1). Ракурс відраховується від хвоста літака в напрямку лінії візування проти часової стрілки. Зміну ракурсу у часі показано на рис. 2.

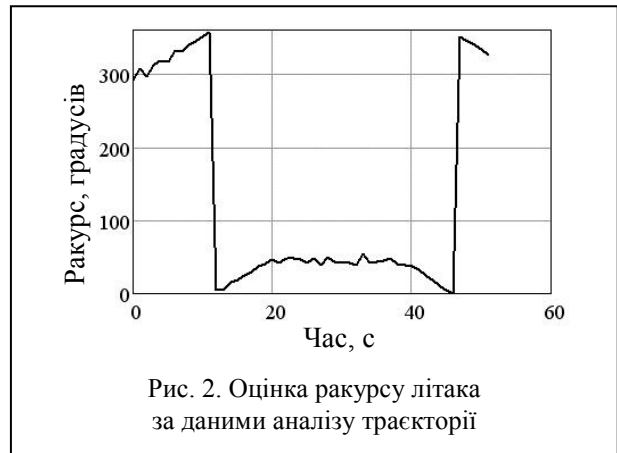


Рис. 2. Оцінка ракурсу літака за даними аналізу траєкторії

Аналіз файлу записаних портретів показав, що для з'ясування параметру дискретизації дальнісних портретів необхідно порівняти їх з портретами того ж літака, отриманими шляхом математичного моделювання. Математичну модель літака було створено С.П. Лещенком за методикою [1], але за умови заміни діелектричних елементів реального літака металевими поверхнями у моделі. С.П. Лещенко також здійснив розшифровку основного файлу з необробленими записами відбитих ширококугових сигналів.

На рис. 3 наведено приклад реальних записів дальнісних портретів літака Цесна-172 у координатах: номер відліку портрету по радіальній дальності – горизонтальна вісь, номер періоду зондування (номер дальнісного портрету) – вертикальна вісь. Амплітуда відбитого сигналу показана змінною яркістю зображення (зображення, що темніше, відповідає більшій амплітуді сигналу).

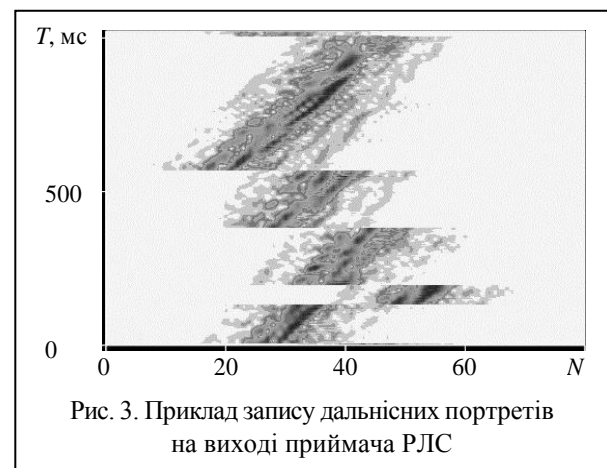


Рис. 3. Приклад запису дальнісних портретів на виході приймача РЛС

Скачки положення дальнісних портретів по радіальній дальності пов'язані з роботою відповідної системи супроводження, інформація про радіальну швидкість літака при цьому зберігається. Темп зондування 1 мс, що відповідає типовій оглядовій РЛС, довжина хвилі зондувального сигналу біля 10 см, зондування ЛЧМ сигналом з дев'яцією біля 450 МГц. Відповідно, інтервал дискретизації по радіальній дальності біля 30 см.

### Принцип отримання двовимірних радіозображень літаків при інверсному синтезі апертури антени

Отримання двовимірних радіозображень базується на доповненні високого розділення за дальністю (що забезпечується використанням широкосмужових зондувальних сигналів) з високим розділенням за частотою Доплера (забезпечуються тривалим когерентним радіолокаційним спостереженням за об'єктом). Основною проблемою при цьому є пропорційна залежність розділення за частотою Доплера від часу спостереження. Від останньої безпосередньо залежить детальність радіозображення.

Радіолокаційне розділення за поперечною дальністю  $\Delta\eta$  визначається довжиною хвилі зондувального сигналу  $\lambda$  та кутом розвороту цілі в азимутальній площині  $\Delta\alpha$  [1]:

$$\Delta\eta = \frac{\lambda}{2\Delta\alpha}. \quad (1)$$

Якщо літак здійснює прямолінійний політ, то розворот забезпечується за рахунок зміни взаємного розташування літака та РЛС. Тому час розвороту на заданий кут збільшується пропорційно відстані до літака. При маневрах літака, час розвороту на заданий кут залежить від маневрених характеристик літака.

Якщо використовується перетворення Фур'є, розворот літака на кут  $\Delta\alpha$  повинен здійснюватися рівномірно. При цьому окремі блискучі елементи літака не повинні виходити за межі "своїх" інтервалів розділення за радіальною дальністю.

При довжині хвилі 10 см для отримання розділення за поперечною дальністю у 60 см (що приблизно дорівнює розділенню за радіальною дальністю у експерименті) літак має здійснити рівномірний розворот в азимутальній площині на кут біля  $5^\circ$ . На початку експериментального запису сигналів таке обертання забезпечувалось на інтервалі часу біля 1 сек. (рис. 2).

Для вирівнювання масштабів поперечної та позовдовжній (радіальній) дальностей радіозображення мають отримуватися з використанням 1024 дальнісних портретів. За цей час радіолокаційного спостереження на рівномірне обертання літака навкруги своєї вертикальної осі вже накладаються випадкові зміни у швидкості обертання навколо інших осей (рискання, крен, тангаж), зникнення одних та поява інших блискучих елементів, міграція блискучих елементів з одного елемента дальності до іншого, а також неточність вирівнювання "стрибків" одновиірних дальнісних портретів (рис. 3).

Результатом цих явищ є отримання розмитого радіозображення (рис. 4 а). Відповідне положення літака у просторі показано на рис. 4 б. Зображення відповідають 0-ій секунді польоту літака.

Отримане двовимірне радіозображення (рис. 4 а) не дає можливості оцінити форму літака, але

надає уявлення про його розміри, та показує наявність окремих областей інтенсивного відбиття радіосигналу. На зображенні добре виділяються дві такі області. Менша відповідає відбиттю від хвостового оперення літака, більша – відбиттю від кабіни, двигуна та крил. Частина фюзеляжу літака взагалі не дає відбитого сигналу, який було б помітно на сформованому зображенні. Це свідчить про те, що аналіз радіозображень відрізняється від аналізу фотографій у оптичному діапазоні.

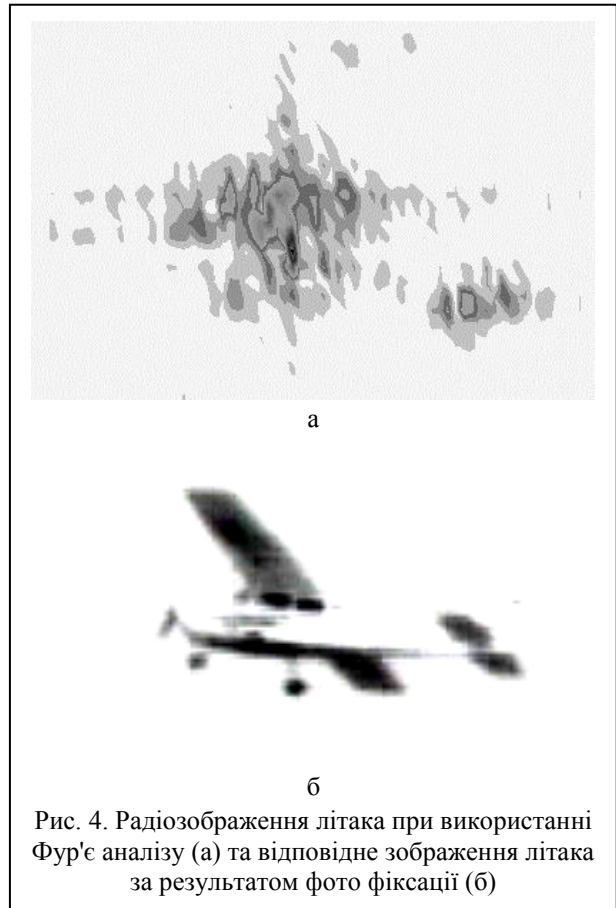


Рис. 4. Радіозображення літака при використанні Фур'є аналізу (а) та відповідне зображення літака за результатом фото фіксації (б)

Як буде показано нижче, вказані області інтенсивного відбиття сигналу формуються за рахунок розмиття окремих блискучих точок, жорстко прив'язаних до елементів літака.

### Метод отримання двовимірних радіозображень з використанням перетворення Габора

Розглянемо можливість спостереження окремих блискучих точок та зміни їхнього положення у часі за рахунок переходу від частотного до часово-частотного аналізу з використанням перетворення Габора [5].

Перетворення Габора є різновидом дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). На відміну від ДПФ, частотному перетворенню підлягає тільки частина сигналу яка виділяється гаусівським вікном зважування, що переміщується у часі. З точністю до нор-

муючого коефіцієнту перетворення Габора задається співвідношенням [5]

$$Gf(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp \left\{ -\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2} \right\} \exp \{-j2\pi ft\} dt, \quad (2)$$

де  $Gf(f, \tau)$  – комплексна спектральна функція перетворення Габора сигналу  $s(t)$ ;

$2\sigma^2$  – параметр, що визначає ширину вікна зважування.

Застосування перетворення Габора у дискретному вигляді до сукупності дальнісних портретів отриманих у натурному експерименті для літака Цесна-172 дозволяє відслідкувати змінення спектру відбитого сигналу в часі у кожному з елементів розділення за радіальною дальністю. Це дає змогу обрати момент часу для отримання найкращого зображення.

На рис. 5 приводяться приклади аналізу часово-частотної структури сигналу у окремому елементі розділення при різних значеннях параметру ширини вікна зважування,  $2\sigma^2 = 128$  (рис. 5 а),  $2\sigma^2 = 256$  (рис. 5 б),  $2\sigma^2 = 512$  (рис. 5 в),  $2\sigma^2 = 1024$  (рис. 5 г). Елемент дальності, що аналізується, містить частину хвостового оперення та крила літака та має найширший спектр.

З рисунку 5 а видно, що у сигналі, відбитому від елемента цілі, спостерігається обмежена кількість частот (приблизно чотири). Кожна з частот відповідає одному блискучому елементу. Видно, що частоти змінюються приблизно за гармонійним законом та попарно перехрещуються з часом. Це можна пояснити зміною кутової швидкості обертання літака під час його руху, літак постійно рискає за курсом.

Збільшення ширини вікна зважування та відповідне збільшення часу спостереження приводять до розмиття окремих частот по всьому спектрі (рис. 5 б,в,г) та до неможливості окремого спостереження блискучих елементів.

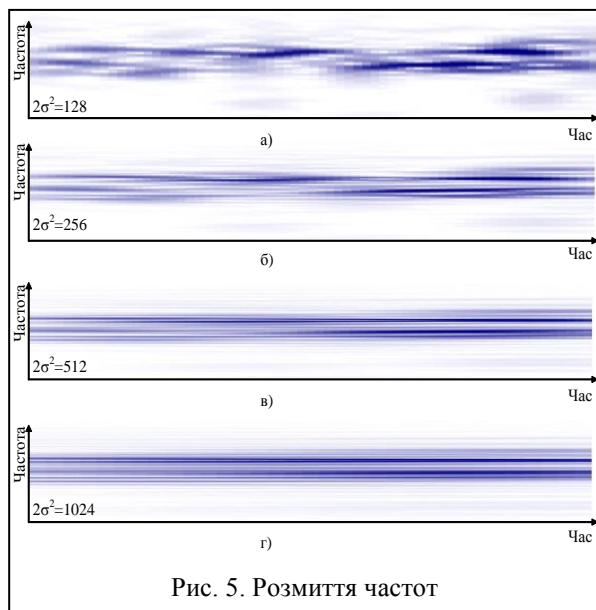


Рис. 5. Розмиття частот

Застосування перетворення Габора до всіх елементів розділення за радіальною дальністю приводе до формування послідовності зображень. При цьому час отримання кожного окремого радіозображення зменшується, з відповідним погіршенням роздільної здатності за поперечною дальністю. Але за рахунок зменшення нестабільностей у русі літака у кожний окремий момент часу можна вибрати проміжок часу, на якому якість зображення буде найвищою. Частина такої послідовності радіозображень для 0-ї секунди польоту показана на рис. 6. Параметр  $2\sigma^2$  у (2) встановлено на рівні 128 відліків.

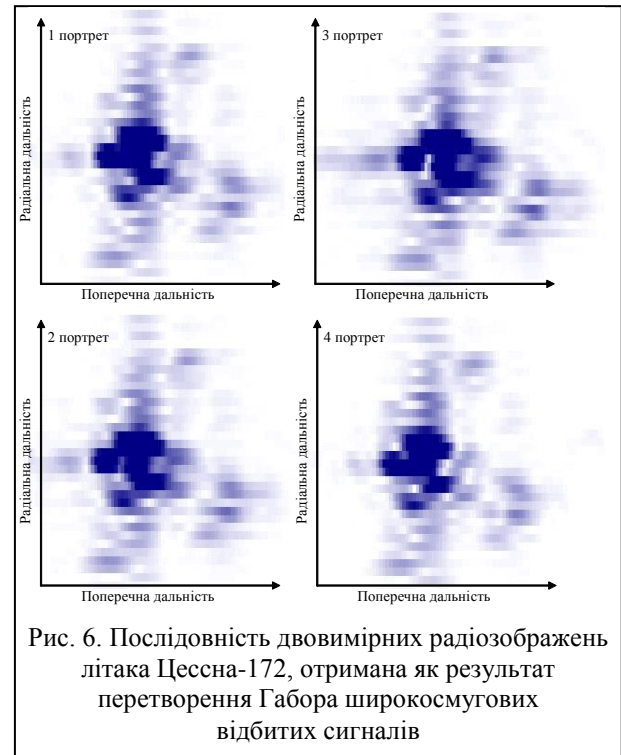


Рис. 6. Послідовність двовимірних радіозображень літака Цесна-172, отримана як результат перетворення Габора широкосмугових відбитих сигналів

З рисунку 6 видно, що якість радіозображення значно покращилась у порівнянні з рис. 4 а. Зображення також містить точки, які відповідають спектральним лініям пропелерної модуляції [1], які далеко виходять за межі зображення та тут не показані. Але положення цих ліній на зображенні точно вказує на положення двигуна (або двигунів) та його тип (пропелерний або турбореактивний). Положення літака у просторі відповідає рисунку 4 б.

Зображення не мають необхідності у коментуванні, оскільки контур літака добре проглядається, розмір літака однозначно визначається масштабом радіальної дальності. Враховуючі, що відліки радіальній дальності слідує приблизно через кожні 30 см, радіальна протяжність зображення становить біля 12 м. Можна порівняти ці дані з реальними розмірами літака (довжина біля 8 метрів, ширина біля 10 метрів). Радіозображення дозволяє однозначно віднести літак до класу легкомоторних пропелерних літаків.

Особливістю радіозображення є те, що воно може не відповідати положенню літака у просторі. Залежно від напрямку обертального руху при маневруванні зображення може стати дзеркальним за поперечною дальністю (по горизонталі).

### Аналіз динаміки двовимірних зображень Цесна-172 в процесі його польоту

Застосування перетворення Габора для отримання послідовностей двовимірних радіозображень дозволяє провести детальний аналіз зміни характеру відбитих сигналів під час польоту літака.

Оскільки розділення за поперечною дальністю основане на вимірюванні частот Доплера у кожному елементі радіальної дальності, поперечний масштаб зображення має постійно змінюватися, а кожний маневр літака (особливо з креном) має приводити до різкого розширення зображення за поперечною дальністю.

Нижче проаналізуємо радіозображення, отримані в різні в моменти часу. Такими моментами є початок та кінець розвороту. Розглянемо також зображення на відрізку прямолінійного польоту коли ракурс літака змінюється дуже повільно. Згідно з даними аналізу траєкторії (рис. 2), швидка зміна крену літака здійснюється при переході від розвороту до прямолінійного польоту наприкінці першого 20-ти секундного інтервалу, а також при переході від прямолінійного польоту до розвороту наприкінці другого 20-ти секундного інтервалу. На рис. 7 приводиться зображення за результатами фото фіксації під час розвороту наприкінці перших 20-ти секунд польоту, літак завершує розворот з постійним креном за часовою стрілкою, після чого поступово вирівнюється та переходить до польоту по прямій з постійним кутом ракурсу (рис. 2). Хвостова частина та ліве крило літака при цьому віддаляються від РЛС (негативний Допплер), праве крило наближається (позитивний Допплер). Нижче на рис. 8 наводяться двовимірні радіозображення, що отримані в процесі розвороту літака на протязі 5 секунд. Пари зображень взяті з інтервалами між ними в 1 секунду.



Рис. 7. Результат фото фіксації літака Цесна-172 наприкінці перших 20 секунд записаного польоту

Аналіз радіозображень показує, що літак має обмежену кількість інтенсивних відбивачів. Просторове розташування відбивачів на радіозображенні залежить від характеру руху літака та може не відповідати структурі літака.

На рис. 8 а зображення отримані під час рівномірного обертання літака за курсом з практично постійним кутом крену. На зображеннях спостерігаються декілька інтенсивних відбивачів на хвості літака (три на лівому зображенні та один на правому), інтенсивні відбивачі на кінцях крил, а також 3-4 відбивача у районі кабіни. Просторове розташування відбивачів викривляє контур літака.

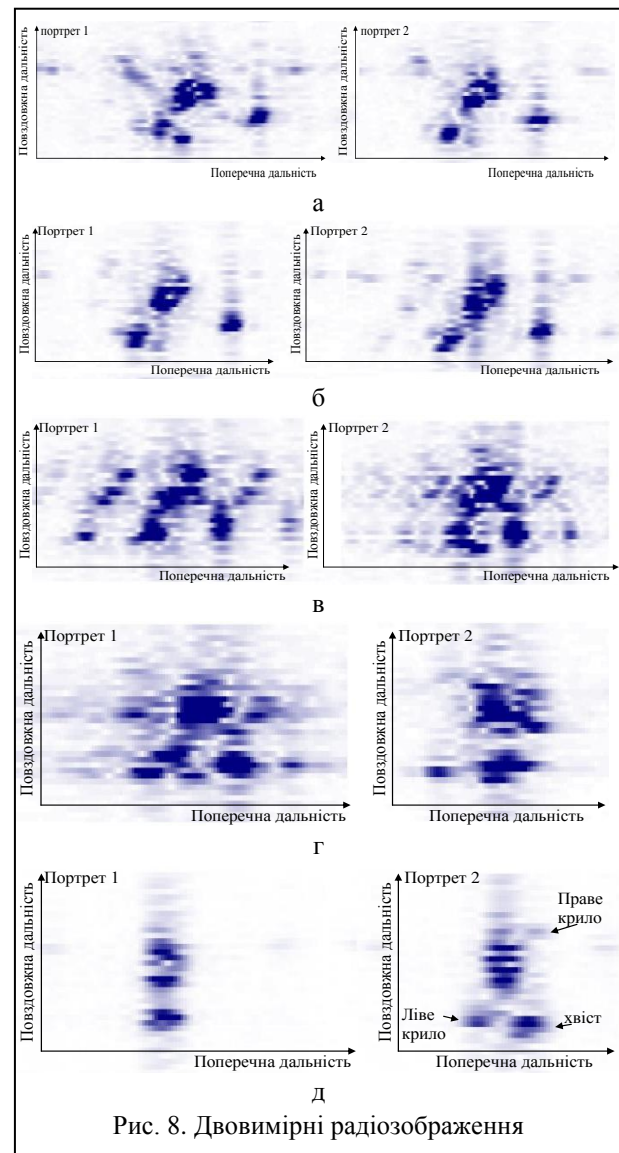


Рис. 8. Двовимірні радіозображення

Радіозображення рис. 8 б отримані коли крен літака також практично не змінюється. Лівого крила практично не видно за рахунок затінення, на правому крилі залишився тільки один інтенсивний відбивач. Добре спостерігається хвіст та фюзеляж літака.

Радіозображення рис. 8 в отримані під час початку вирівнювання літака, при цьому активна зміна

кута крену приводить до зміщення точок радіозображення за межі літака (зображення хвоста розширилось та змістилось). Це можна пояснити тим, що замість негативного здвигу доплерівської частоти за рахунок обертання по курсу, сигнали відбиті від елементів хвостового оперення набувають позитивного доплерівського здвигу за рахунок крену.

Радіозображення рис. 8 г та 8 д отримані під час поступового переходу літака до прямолінійного польоту. Про це свідчить зменшення розміру радіозображення за поперечною дальністю. Під час прямолінійного польоту за рахунок рискань літака за курсом радіозображення періодично пропадає (рис. 8, д, зліва) та з'являється (рис. 8, д, справа), але в залежності від напрямку рискання зображення може змінюватися на дзеркальне відносно вертикальної вісі. Саме дзеркальне зображення спостерігається у останньому випадку.

### Висновки

Як показало дослідження, двовимірні радіозображення можуть бути дуже інформативними. Вони дозволяють однозначно визначити тип об'єкту, що знаходиться у зоні дії радіолокатора та можуть бути використані для сортування повітряних об'єктів за ступенем їхньої небезпеки, а також відокремити хибні та відволікаючі цілі від цілей, що є дійсно небезпечними.

Труднощі пов'язані з отриманням радіозображень можна перебороти за рахунок використання часово-частотних методів обробки відбитих сигналів. При цьому навіть радіозображення, які не забезпечують високого розділення за поперечною відстанню (польот з постійним кутом ракурсу відносно

РЛС), відображають розташування характерних відбивачів літака та характер його рискань за курсом. Останні чітко відбиваються на динаміці радіозображень та також відображають тип літака.

В результаті, обмеження щодо малої відстані отримання двовимірних радіозображень значно можуть полегшуватися за рахунок спостереження за літаком під час його маневрування.

Якість радіозображень може в подальшому бути покращеною за рахунок використання інших методів часово-частотного аналізу з більш високими роздільними здатностями за частотою.

### Список літератури

1. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking / Ya.D. Shirman, S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko et al. – Boston-London: Artech House, 2002. – 294 p.
2. Steinberg B.D. Microwave imaging of aircraft / B.D. Steinberg // Proceedings of the IEEE, – 1988. – Vol.76, No. 12. – P..1578-1592.
3. Сайт northropgrumman.com/solutions [електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: : <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/apg68/assets/APG68.pdf>
4. Chen .V.C. Time-frequency transforms for radar imaging and signal processing / V.C. Chen, H. Ling. – Boston-London: Artech House, 2002. – 214 p.
5. Лазоренко О.В. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор. – Х.:ХНУ имени В.Н. Каразіна, 2009. – 576 с.

Надійшла до редколегії 30.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук с.н.с. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ САМОЛЕТОВ НА ОСНОВЕ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАБОРА

В.М. Орленко

*Автоматическое радиолокационное распознавание воздушных объектов по степени опасности и селекция ложных и отвлекающих целей становятся все более актуальными при создании автоматизированных систем управления Воздушными Силами. При этом двумерные радиоизображения могут использоваться как для автоматического распознавания, так и для контроля со стороны человека-оператора за процессом распознавания в сложных ситуациях. В статье разрабатывается метод получения двумерных радиоизображений на основе время-частотного преобразования Габора. При этом вместо одиночных радиоизображений низкого качества получают последовательности радиоизображений, качество которых может значительно улучшаться. С помощью разработанного метода анализируются двумерные радиоизображения самолета Цессна-172, полученные на основе экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** радиолокационное распознавание, инверсный синтез апертуры антенны, радио изображение, широкополосный радиолокационный сигнал.

### METHOD FOR TWO-DIMENSIONAL RADAR IMAGING OF AIRCRAFT BASED ON GABOR TIME-FREQUENCY TRANSFORM

V.M. Orlenko

*Automatic target classification of aerial objects according to their relative dangerousness and selection of false and deceptive targets become more important when designing automated control systems for Air Forces of Ukraine. The two-dimensional radio images of objects can be used both for automatic radar target recognition and for controlling the automatic recognition process by the operator in complicated scenarios. The method for generating two-dimensional radio images of aircraft is developed in the paper based on the Gabor time-frequency transform. Using this method, instead of standalone images of poor quality one obtains series of dynamically changed images of better quality. Two-dimensional images of Cessna-172 aircraft based on experimental radar data are analyzed using the method developed in the paper.*

**Keywords:** radar recognition, inverse synthesis of aperture of radar, radar imaging, wideband radar signal.