

УДК 621.396.96

С.В. Кліменков, Б.О. Чумак

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ДИНАМІЧНО ВІДДІЛЯЮТЬСЯ

Аналізується процес виявлення траєкторії повітряного об'єкту, що динамічно відділяється від літака-носія, який супроводжується чотирьохкоординатною багатофункціональною РЛС з ФАР методом активного дискретного супроводу. Запропонований підхід до синтезу алгоритмів виявлення траєкторій об'єктів, що відділяються, з урахуванням динаміки відносного руху повітряного об'єкту і літака-носія. Розглянутий метод розрахунку показників якості процесу виявлення траєкторій таких об'єктів стосовно аналізованої чотирьохкоординатної багатофункціональної РЛС.

Ключові слова: виявлення траєкторій повітряних об'єктів, багатофункціональна РЛС з ФАР, синтез алгоритмів виявлення траєкторій, показники якості виявлення траєкторій.

Вступ

Аналіз літератури і постановка задачі. Ускладнення завдань, що вирішуються радіолокаційними комплексами, зумовило появу і широкий розвиток нового класу радіолокаційних станцій (РЛС), що отримали назву багатофункціональних РЛС (БФ РЛС) [1].

Зокрема, широкого поширення набули багатофункціональні чотирьохкоординатні (азимут, кут місця, дальність, радіальна швидкість) РЛС з ФАР, такі, що використовують для вимірювання координат метод активного дискретного супроводу [2].

Одне із завдань, що вирішуються такими станціями – це автоматичне виявлення траєкторій об'єктів, що відділяються від цілей, що супроводжуються цими РЛС. Якість її рішення багато в чому визначається відповідним вибором моделей руху об'єктів і алгоритмів виявлення траєкторій, що можливо тільки за наявності необхідного методичного апарату [1, 3, 4].

Розглянута в [1, 3, 4] математична модель траєкторії цілі припускає маневрування повітряної цілі за швидкістю і напрямком. При цьому передбачається, що маневрування за швидкістю обмежене допустимим для літальних апаратів тангенціальним прискоренням, яке не перевищує $(0,8 \dots 1,0)g_0$, де $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння, а маневрування за напрямком (віраж) може здійснюватися із значно більшим перевантаженням $n = g_m / g_0 = 5 \dots 8$ одиниць, де g_m – нормальне прискорення маневру.

Такі допущення справедливі лише для пілотованих літальних апаратів.

Разом з тим, ряд повітряних цілей (наприклад, авіаційні керовані ракети (АКР) класів «повітря – повітря», «повітря – поверхня») [5, 6] мають значно більші маневрені можливості: тангенціальне при-

скорення на початковій ділянці польоту може досягати величини до 20 одиниць, наявні нормальні перевантаження складають 15...20 й більше одиниць.

Після пуску АКР літак-носії може здійснювати маневр (наведення АКР здійснюється автономно за даними бортової інформаційної системи), при цьому обмеження на інтенсивність і вид маневру, прийняті вище, залишаються також справедливими.

Аналіз [5, 6] дозволяє зробити висновок про те, що на початковій ділянці польоту АКР здійснює рух практично з постійним тангенціальним прискоренням по курсу літака-носія на момент пуску, тобто має місце маневр за швидкістю із значним, порядку $(7 \dots 20)g_0$, тангенціальним прискоренням.

У [1 – 4] рух цілі розглядається відособлено від руху інших об'єктів і, як наслідок, вибір розмірів захватних і селектуючих стробів також проводиться в припущенні відособленого руху цілі. Крім того, методи синтезу алгоритмів і розрахункові співвідношення для аналізу показників якості виявлення траєкторій розглядаються стосовно тільки до оглядових РЛС.

Метою статті є розгляд особливостей функціонування сучасних зразків багатофункціональних РЛС під час виявлення траєкторій об'єктів, що динамічно відділяються, формулювання основних положень підходу до синтезу алгоритмів виявлення траєкторій таких об'єктів та розробка методу розрахунку показників якості виявлення траєкторій подібних об'єктів стосовно аналізованої чотирьохкоординатної БФ РЛС.

Основний матеріал

Розглянемо ситуацію, коли чотирьохкоординатна БФ РЛС здійснює супровід повітряної цілі, і у момент часу t_0 з неї проводиться пуск АКР. Після пуску АКР у момент часу

$$t = t_0 + t_{\text{пм}}$$

супроводжувана БФ РЛС ціль здійснює маневр в горизонтальній або (та) вертикальній площинах з інтенсивностями $a_{\text{а}}$, $a_{\text{в}}$ і тривалістю $t_{\text{мг}}$, $t_{\text{мв}}$.

Виявлення траєкторії АКР що відділяється, проводиться за інформацією, яка поступає з багатоканального по дальності і швидкості (матричного) приймача виявлення, який забезпечує паралельний огляд простору в околицях супроводжуваної цілі.

У загальному випадку для вирішення цього завдання використовується об'єднаний алгоритм виявлення траєкторії за критерієм "2/m+l/n" [1, 4].

Після виявлення і підтвердження траєкторії об'єкту, що відділяється, вона передається на супровід у виділений цільовий канал багатфункціональної РЛС.

Особливість процесу виявлення при цьому полягає в тому, що, по-перше, відсутнє кутове розрізнення об'єкту, що відділяється, і супроводжуваної цілі, по-друге, спостерігається їх відносний рух по дальності та радіальній швидкості.

Як відомо, основними операціями, що виконуються в процесі виявлення траєкторії, є екстраполяція координат і стробування відміток [1, 3, 4].

При визначенні показників якості виявлення траєкторії для описаної вище ситуації приймемо наступні допущення, відповідні реальному руху об'єктів:

- екстраполяція координат об'єкту, що відділяється, проводиться відповідно до гіпотези про рівноприскорений рух об'єкту, що відділяється, по курсу літака-носія на момент виявлення сигналу (відмітки) цілі, що відділяється;
- строби на всіх етапах мають форму прямокутника.

Процес виявлення траєкторії об'єкту, що відділяється, починається з утворення початкового строба первинного захвату (СтрПЗ) навколо одиничної відмітки належної області аналізу.

Розміри початкового СтрПЗ $\Delta D_{\text{макс}}$, $\Delta V_{\text{макс}}$ визначаються виходячи з максимально можливого (відносно супроводжуваної цілі) переміщення об'єкту, що відділяється, за період звернення (цикл роботи) $T_{\text{ц}}$ БФ РЛС і можливих похибок (середньостатистичних або паспортних для даного типу РЛС) вимірювання координат σ_D , σ_V .

При прийнятих допущеннях щодо руху об'єкту, що відділяється, ці величини визначаються наступними виразами:

$$\Delta D_{\text{макс}} = \frac{a_{\text{отн.макс}} T_{\text{ц}}^2}{2} + \sigma_D;$$

$$\Delta V_{\text{макс}} = a_{\text{отн.макс}} T_{\text{ц}} + \sigma_V,$$

де $a_{\text{отн.макс}}$ – максимальне радіальне прискорення

об'єкту, що відділяється, щодо супроводжуваної цілі, визначене з урахуванням як динаміки руху (маневру) супроводжуваної цілі, так і динаміки руху об'єкту, що відділяється.

При цьому екстрапольовані значення дальності і швидкості об'єкту, що відділяється, обчислюються по формулах:

$$V_{zi} = V_{i-1} + (V_{i-1} - V_{i-2}) = 2V_{i-1} - V_{i-2};$$

$$D_{zi} = D_{i-1} + V_{i-1} T_{\text{ц}} + \frac{(V_{i-1} - V_{i-2}) \cdot T_{\text{ц}}}{2}.$$

Лінійні розміри подальших (селектуючих) стробів залежать від можливих сумарних помилок вимірювання і екстраполяції координат цілі, що відділяється $\sigma_{D\Sigma i}$ і $\sigma_{V\Sigma i}$ і визначаються виразами [4]:

$$\Delta D_{\text{стри}} = k \cdot \sigma_{D\Sigma i};$$

$$\Delta V_{\text{стри}} = k \cdot \sigma_{V\Sigma i};$$

де k – коефіцієнт збільшення розміру строба в порівнянні з середньоквадратичним значенням сумарного відхилення зміряної координати дальності $\sigma_{D\Sigma i}$ і швидкості $\sigma_{V\Sigma i}$ від екстрапольованого значення.

Величина k вибирається виходячи з умови забезпечення ймовірності попадання до стробу відмітки (сигналу) від об'єкту, що відділяється, близької до одиниці (зазвичай $k \approx 3$) [3, 4].

Умова наявності відмітки в стробі відповідає умові виконання нерівностей:

$$|D_i - D_{zi}| \leq \frac{\Delta D_{\text{стри}}}{2};$$

$$|V_i - V_{zi}| \leq \frac{\Delta V_{\text{стри}}}{2},$$

де D_i , V_i – вимірюване значення координат у i -му огляді (цикл роботи) БФ РЛС;

D_{zi} , V_{zi} – екстрапольоване значення координат на i -й огляд (цикл роботи) БФ РЛС

Якість процесу виявлення траєкторії цілі, що відділяється, оцінюватимемо наступними показниками [1 – 4]:

- ймовірністю правильного виявлення (зав'язки) траєкторії об'єкту, що відділяється;
- ймовірністю помилкового виявлення (зав'язки) траєкторії об'єкту, що відділяється;
- середнім числом помилкових траєкторій об'єктів, що відділяються, передаваних на супровід за цикл роботи БФ РЛС;
- середнім числом помилкових траєкторій об'єктів, що відділяються, які знаходяться на виявленні (в процесі виявлення) в сталому режимі роботи БФ РЛС.

Загальна методологія визначення вищезазначених показників детально викладена в [1, 3, 4]. Суть її

полягає в статистичному аналізі схеми роботи алгоритму виявлення траєкторій (графа з випадковими переходами) у разі виявлення помилкової і дійсної траєкторії.

Розглянемо особливості її застосування при розрахунку показників якості процесу виявлення траєкторії об'єкту, що відділяється, аналізованою чотирьохкоординатною БФ РЛС.

В [1-4] при статистичному аналізі за одиницю вимірювання розміру строба береться роздільна здатність РЛС по відповідному вимірюваному параметру, внаслідок чого кількість елементів аналізу визначається числом розділюваних об'ємів РЛС, що знаходяться у відповідному стробі або області огляду (аналізу).

У аналізованому випадку фізично кількість елементів розділу, що знаходяться у відповідних стробах або області огляду, рівна загальному числу каналів дальності і швидкості багатоканального приймача (матриці) виявлення.

При цьому розподіл помилкових відміток в зоні виявлення (області аналізу) можна прийняти рівномірним, оскільки ймовірність появи помилкової відмітки в кожному з каналів приймача виявлення однакова.

В цьому випадку площа початкового строба первинного захвату (кількість каналів багатоканального приймача виявлення, що перекривають вказаний діапазон $\pm \Delta D_{\text{макс}}$, $\pm \Delta V_{\text{макс}}$) буде визначатися наступними співвідношеннями:

$$N_i = N_{di} \cdot N_{vi}$$

$$N_{di} = \left[1 + \frac{2\Delta D_{\text{макс}}}{\delta D} \right];$$

$$N_{vi} = \left[1 + \frac{2\Delta V_{\text{макс}}}{\delta V} \right],$$

де δD , δV - рознесення настройок каналів приймача виявлення по дальності і швидкості відповідно.

Площа і-го СтрПЗ визначається по формулі:

$$N_{ii} = i^2 \cdot N_i.$$

Аналогічно площі подальших (селектуючих) стробів захоплення визначаються таким чином:

$$N_i = N_{di} \cdot N_{vi};$$

$$N_{di} = \left[1 + \frac{2\Delta D_{\text{стр}i}}{\delta D} \right];$$

$$N_{vi} = \left[1 + \frac{2 \cdot \Delta V_{\text{стр}i}}{\delta V} \right],$$

де $\Delta D_{\text{стр}i}$, $\Delta V_{\text{стр}i}$ - лінійний розмір селектуючого стробу по відповідному параметру.

Для отримання шуканої ймовірності станів графу переходів необхідне знання ймовірності відсутності помилкових відміток в і-му стробі і в області пошуку цілей, що відділяються.

Ймовірність q_{N_i} відсутності помилкових відміток в і-му стробі визначається виразом [3]:

$$q_{N_i} = \exp(-n_0 \cdot N_i),$$

де n_0 - середнє число помилкових відміток, що доводиться на один канал приймача виявлення за період огляду (цикл роботи БФ РЛС).

Для даного випадку значення n_0 визначається з формули

$$n_0 = \frac{\overline{N_{\text{ЛО}}}}{N_{\text{К}}},$$

де $\overline{N_{\text{ЛО}}}$ - середня кількість помилкових відміток, що поступає з багатоканального приймача виявлення за період огляду (цикл роботи) БФ РЛС в одному цільовому каналі;

$N_{\text{К}} = N_{\text{D}} \cdot N_{\text{V}}$ - загальна кількість каналів багатоканального приймача виявлення.

Ймовірність

$$P_1 = 1 - q_{N_0}$$

появи в області пошуку (аналізу) одиночної помилкової відмітки, що приймається за початок нової траєкторії, визначатиметься виразом

$$P_1 = 1 - q_{N_0} = 1 - \exp(-n_0 \cdot N_{\text{ан}}),$$

де $N_{\text{ан}} = N_{\text{анD}} \cdot N_{\text{анV}}$ - загальна кількість каналів багатоканального приймача виявлення, виділена для пошуку цілей, що відділяються.

Розрахункові співвідношення, приведені в [1, 3, 4], дозволяють визначити середнє число помилкових траєкторій об'єктів, що відділяються, передаваних на супровід, при аналізі інформації тільки від однієї супроводжуваної цілі за цикл роботи багатфункціональної РЛС, тобто в одному цільовому каналі $N_{\text{ЛТ}_{\text{цк}i}}$.

При супроводі декількох цілей сумарне середнє число помилкових траєкторій об'єктів, що відділяються, передаваних на супровід (вважаючи канали незалежними) за цикл роботи БФ РЛС, визначатиметься таким виразом:

$$\overline{N_{\text{ЛТ}\Sigma}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{цл}}} \overline{N_{\text{ЛТ}_{\text{цк}i}}},$$

де $N_{\text{цл}}$ - кількість одночасно супроводжуваних БФ РЛС цілей.

Аналогічно, середнє число помилкових траєкторій об'єктів, що відділяються, які знаходяться на

виявленні (в процесі виявлення) в сталому режимі роботи БФ РЛС визначається як

$$N_{0ЛТ\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{сц}}} N_{0ЛТЦКі}$$

Моделювання на ЕОМ процесу функціонування існуючих зразків багатофункціональних РЛС при виявленні об'єктів, що динамічно відділяються, показало, що застосування алгоритмів виявлення траєкторій, які враховують динаміку відносного руху об'єкту, що відділяється, і літака-носія приводить до підвищення ймовірності правильного виявлення об'єкту, що відділяється, в 1,1...1,5 рази при непогіршенні фільтруючих здібностей алгоритмів виявлення.

Висновки

Урахування динаміки відносного руху об'єкту, що відділяється, і літака-носія при синтезі алгоритмів виявлення траєкторій БФ РЛС забезпечує поліпшення показників якості виявлення траєкторій об'єктів, що відділяються.

Запропонований метод розрахунку показників якості виявлення траєкторій об'єктів, що відділяються, враховує особливості функціонування чотирьохкоординатної багатофункціональної радіолокаційної станції і дозволяє проводити порівняльний аналіз різних алгоритмів виявлення траєкторій, визначати вимоги до ЕОМ вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Список літератури

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: Издательство КВиЦ, 2000. – 428 с.
2. Шишов Ю.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов: учеб. пособие / Ю.А. Шишов, В.А. Ворошилов – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
3. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации: учеб. пособие / С.З. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1974. – 432 с.
4. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации: учебное пособие / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
5. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / Под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 815 с.
6. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

Надійшла до редколегії 27.10.2009

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.М. Седишев, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДИНАМИЧНО ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.В. Клименков, Б.О. Чумак

Анализируется процесс обнаружения траектории воздушного объекта, динамично отделяющегося от самолёта-носителя, сопровождаемого четырехкоординатной многофункциональной РЛС с ФАР методом активного дискретного сопровождения. Предложен подход к синтезу алгоритмов обнаружения траекторий отделяющихся объектов с учетом динамики относительного движения воздушного объекта и самолёта-носителя. Рассмотрен метод расчёта показателей качества обнаружения траекторий таких объектов применительно к анализируемой четырехкоординатной МФ РЛС.

Ключевые слова: обнаружение траекторий воздушных объектов, многофункциональная РЛС с ФАР, синтез алгоритмов обнаружения траекторий, показатели качества обнаружения траекторий.

ESTIMATION METHOD OF QUALITY DETECTION INDEXES OF DYNAMICALLY SEPARATED AIR OBJECTS TRAJECTORIES

S.V. Klimenkov, B.O. Chumak

The dynamically separated air object trajectory detection process in four-coordinate multifunctional radar station with phased array antenna by the method of active quantified track is analyzed. It is proposed the approach to the algorithms synthesis of separated objects trajectory detection with take into account the dynamic of air object and aircraft-launcher relative movement. It is considered estimation method of quality detection indexes of such objects as to analyzed four-coordinate multifunctional radar station..

Keywords: air objects trajectory detection, multifunctional radar station with phased array antenna, trajectories detection algorithm synthesis, trajectories quality detection indexes.