

УДК 621.391.26

Х.А. Турсунходжаєв, О.Ю. Лавров

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АЛГОРИТМИ СУПРОВОДЖЕННЯ ПОСТАНОВНИКІВ АКТИВНИХ ЗАВАД ТА ЇХ АНАЛІЗ

Розглядаються алгоритми фільтрації для супроводження постановника активних завад в триангуляційній системі локації. Здійснюється їх порівняльний аналіз, для чого математично моделюється триангуляційна система, процес вимірювання пеленгатором кутових координат та робота пристрою фільтрації на різних етапах обробки радіолокаційної інформації. Отримано, кількісні оцінки помилок визначення координат постановника активних завад.

Ключові слова: пасивна радіолокація, триангуляційний метод, фільтрація, показники якості.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз останніх війн показує, що для прориву протиповітряної оборони противника використовуються постановники активних маскуючих завад (ПАЗ). Це призводить до різкого зменшення дальності дії активних радіолокаційних станцій (РЛС), або й до неможливості ведення радіолокаційної розвідки взагалі. Тому є необхідність в переході на методи пасивної локації. Одним з таких методів, що дозволяє в якості джерел радіолокаційної інформації (РЛІ) використовувати відомості, отримані з подавлених активних РЛС. Яким є триангуляційний метод пасивної локації.

Реалізація триангуляційного методу передбачає створення на основі кутових вимірів декількох РЛС триангуляційних комірок, в межах яких здійснюється визначення координат ПАЗ, та вимагає попереднього вирішення ряду задач. До них відносяться:

1. Приведення кутових координат до єдиного моменту часу.
2. Ототожнення точок перетинів пеленгів.
3. Перерахунок кутових координат з урахуванням кривизни Землі та дислокації джерел РЛІ[1].

Перераховані раніше процедури дозволяють вирішити завдання первинної обробки РЛІ, тобто завдання оцінки площинних координат ПАЗ на основі одноразово вимірюваних азимутальних і кутових значень.

Очевидним є необхідність реалізації алгоритмів вторинної обробки РЛІ. Вони дозволяють оцінити ряд параметрів руху цілей і вирішити завдання об'єднання даних по сукупності супроводжуваних повітряних об'єктів.

Вирішення перерахованих задач дає можливість визначити місцезнаходження ПАЗ, але для підвищення показників якості та супроводження ПАЗ необхідно і доцільно здійснювати згладжування (фільтрацію) координат.

Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій. В даний час досить докладно досліджені

особливості калмановської фільтрації при супроводженні цілей, траєкторії яких описуються в загальному випадку марківськими процесами [2]. На практиці широко використовуються алгоритми супроводження цілей, траєкторії яких являють собою реалізацію гауссово-марківських процесів [3]. Представлені в цьому разі рекурентні співвідношення, що описують процедури фільтрації, достатньо просто реалізуються на практиці. Відома залежність структури алгоритму фільтрації як від характеру руху цілей, так і від системи координат в якій супроводжується ціль.

Специфічні особливості триангуляційного методу локації призводять до необхідності виявлення та оцінки можливих варіантів алгоритмів супроводження ПАЗ.

Метою статті є аналіз можливих алгоритмів супроводження постановників перешкод по даним триангуляційної системи локації.

Основний матеріал

В загальному випадку можливі три варіанти побудови алгоритму супроводження ПАЗ (рис. 1):

1. Фільтрація кутових вимірів перед вирішенням задачі триангуляції.
2. Фільтрація розрахованої на основі вимірюваних в пунктах прийому азимутальних і кутомістних координат ПАЗ дальності.

3. Фільтрація проєкцій вектора дальності в декартовій системі координат. Перший і другий варіанти фільтрації повинні базуватися на нелінійному характері зміни супроводжуваних координат. Дійсно, навіть при польоті цілі з постійним курсом, швидкістю і на постійній висоті кутові координати а також дальність до цілі змінюються нелінійно.

У третьому випадку координати X і Y в декартовій системі координат змінюються лінійно для розглянутої моделі польоту цілі.

Структурні схеми триангуляційної системи, що відповідають вказаним варіантам, зображені на рис. 1.

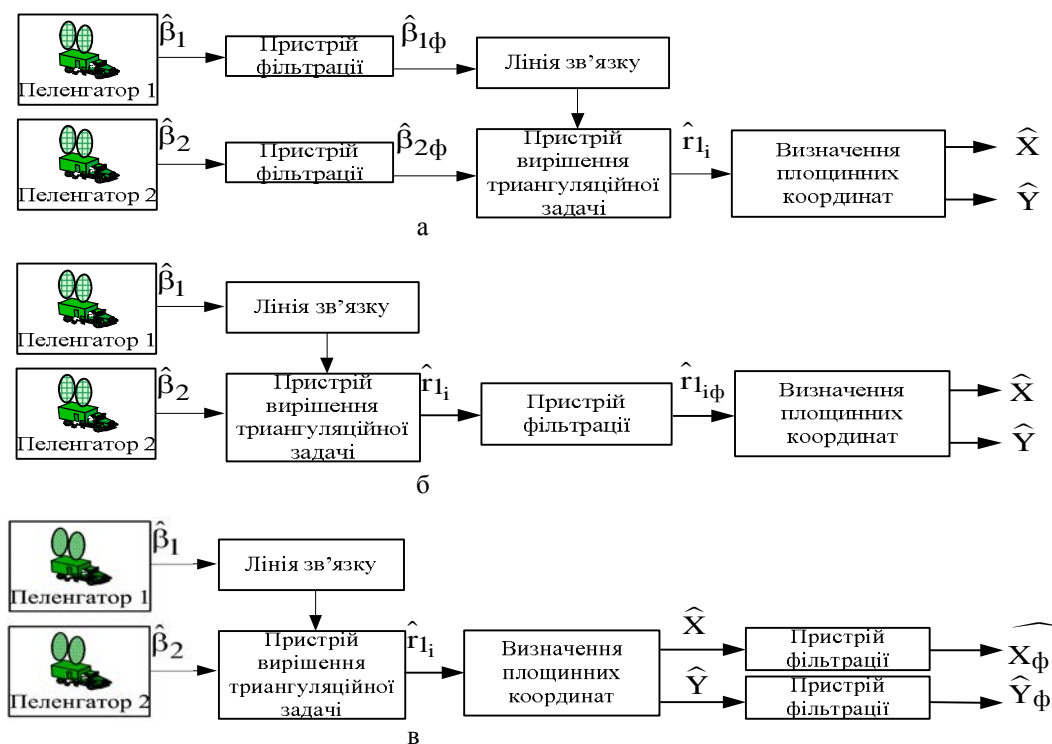


Рис. 1. Структурні схеми триангуляційних систем: а – фільтрація кутових вимірів; б – фільтрація дальності; в – фільтрація площинних координат.

Розглянемо алгоритм фільтрації параметрів траєкторії [1], що широко використовується на практиці. Він побудований на основі лінійної моделі зміни параметрів траєкторії. Рекурентне співвідношення даного алгоритму фільтрації можна представити у вигляді:

$$\hat{\alpha}_{k+1} = \bar{B}_k \hat{\alpha}_k + \bar{L}_{k+1} \left\{ \hat{\theta}_{k+1} - \hat{\theta}_{0_{k+1}} \right\}, \quad (1)$$

де $\hat{\alpha}_k$ - вектор стану, що відповідає k -тому циклу обзору; \bar{B}_k - матриця динамічного перерахунку (перетворення значення параметрів попереднього кроку); $\hat{\theta}_{k+1}$ - результат однократного вимірювання на $k+1$ кроці; $\hat{\theta}_{0_{k+1}}$ - прогноз вектора спостереження на $k+1$ кроці; \bar{L}_{k+1} - матриця вагових коефіцієнтів (коефіцієнт при невязці), що визначають вагу чергового $k+1$ вимірювання та прогнозу.

Вираз (1) дозволяє визначити оцінку вектора стану $\hat{\alpha}_{k+1}$ на основі попередньої оцінки $\hat{\alpha}_k$ і поточної оцінки вектора спостереження $\hat{\theta}_{k+1}$ з урахуванням їх характеристик точності [1].

Відмінність реального характеру зміни супроводжуваного параметра від лінійного закону може привести до появи систематичної помилки. На рис. 2 приведені результати фільтрованих значень відповідно відношення (1). Рис 2, а, б, в, г відповідає результатам фільтрації кутових вимірів, дальності і площинних координат (X, Y) відповідно.

З рис. 2 а, б видно, що нелінійний характер зміни кутових координат і дальності приведе до появи систематичної помилки. Така помилка відсутня при супроводженні координат X та Y з подальшим відшукуванням дальності (рис. 2, в, г).

В загальному випадку необхідно, провівши аналіз невязки (1), оцінити відмінність супроводжуваної і реальної моделі траєкторій та перейти до алгоритму, що відповідає цій моделі. На практиці коефіцієнт при невязці фіксується при досягненні ним деякого заздалегідь вибраного значення.

Зменшення коефіцієнта при невязці призводить до того, що під час формування оцінки фільтрованого параметра, більша вага віддається прогнозу, а не оціненому значенню.

Для порівняння розглянутих раніше алгоритмів фільтрації раціонально використовувати критерій мінімуму суми квадратів випадкової та систематичної помилок.

Таку оцінку можна провести шляхом математичного моделювання пристрою фільтрації, імітуючи роботу пеленгаційних пунктів за допомогою генераторів випадкових чисел.

Статистична модель процесу пеленгації, фільтрації та оцінки випадкових і систематичних помилок складається з:

1. Моделі триангуляційної системи, яка включає два пункти прийому, рознесених на величину, що задається довільною базою, а також траєкторію польоту постановника завад, його швидкість і напрямком.

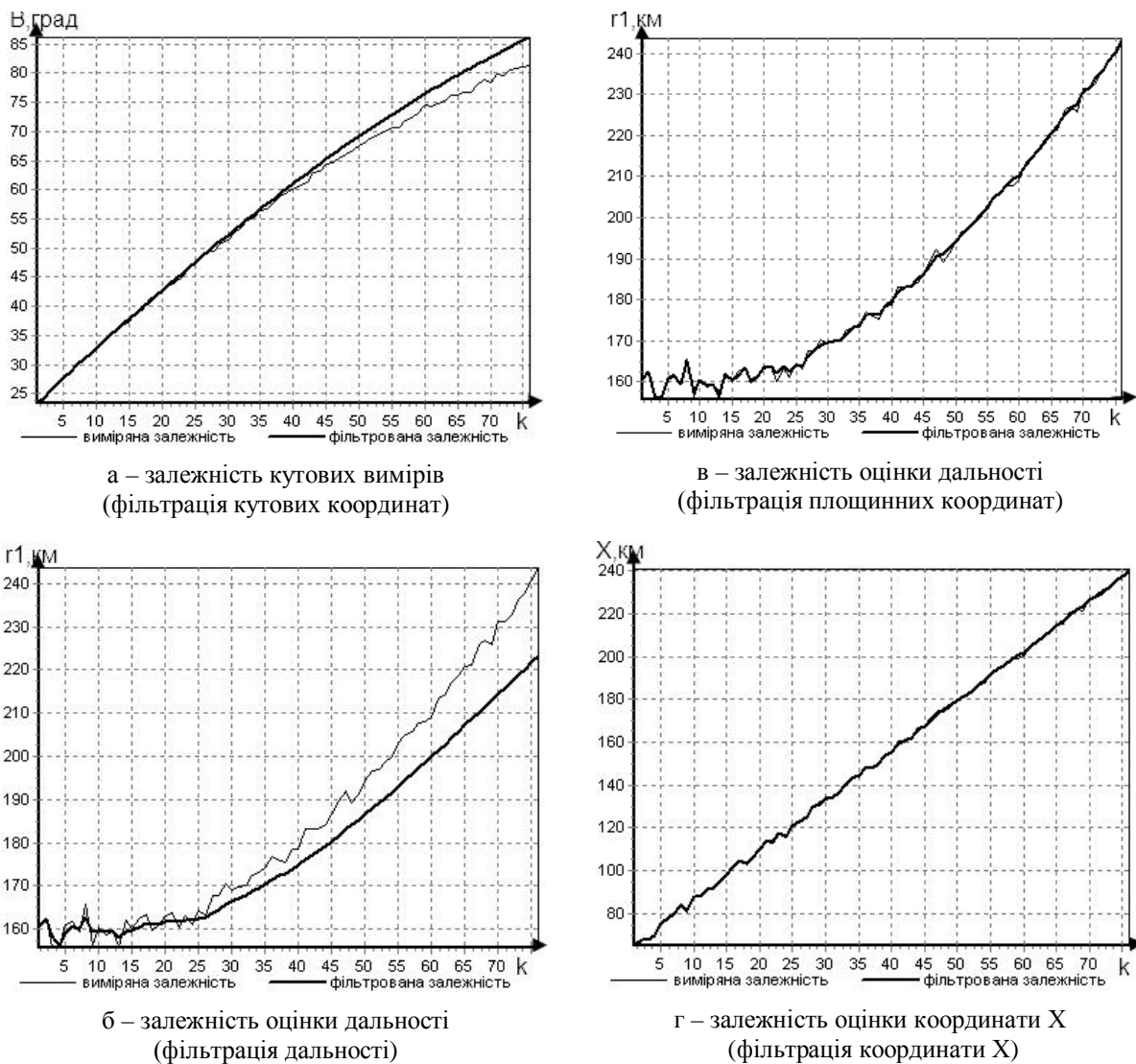


Рис. 2. Залежності фільтрованих параметрів

2. Модель процесу вимірювання пеленгатором куткових координат включає:

- оцінку істинних значень азимутів постановника активних завод щодо пунктів прийому;
- додавання до оцінених азимутальних значень випадкової величини, що вибирається з генератора випадкових чисел, розподілених за нормальним законом при заданій дисперсії.

3. Модель процесу фільтрації на відповідному етапі обробки РЛЛ.

Раніше було зазначено, що характер зміни фільтрованих параметрів зазвичай не відповідає лінійній моделі. Тому, необхідно шляхом статистичного моделювання оцінити величини систематичної і випадкової помилок для кожного з можливих варіантів супроводження ПАЗ.

Методика проведення статистичного випробування полягає в наступному.

Для кожного циклу огляду оцінюється згладжене значення параметра, що фільтрується і його приріст. При цьому на вхід пристрою фільтрації

подаються одноразово оцінені значення супроводжуваних параметрів відповідно до описаної раніше моделі процесу вимірювання та варіанту супроводження ПАЗ.

Для оцінки величини систематичної та випадкової помилок розроблена модель, яка включає наступні процедури:

1. Задання істинних координат ПАЗ на кожний огляд простору пеленгаторами.
2. Імітація n вимірювань куткових координат за допомогою генератора випадкових чисел з відповідними параметрами.
3. Вирішення триангуляційної задачі визначення площинних координат та фільтрація на відповідних етапах згідно з варіантами супроводження ПАЗ.
4. Визначення різниці між математичним очікуванням, оціненої після фільтрації, дальності та її істинним значенням – систематична помилка:

$$D_{\hat{r}_{\text{нв}} - r_{\text{нв}}} = r_{\text{нв}} - \frac{1}{50} \sum_{z=1}^{50} \hat{r}_{z1}. \quad (2)$$

5. Визначення дисперсії випадкової помилки:

$$D_{\hat{r}_i} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\hat{r}_i - M(\hat{r}_i)]^2. \quad (3)$$

Оцінки систематичної та випадкової помилок для варіанту, коли фільтруються кутові вимірювання (пеленги) на ПАЗ, зображені на рис. 3 а,б.

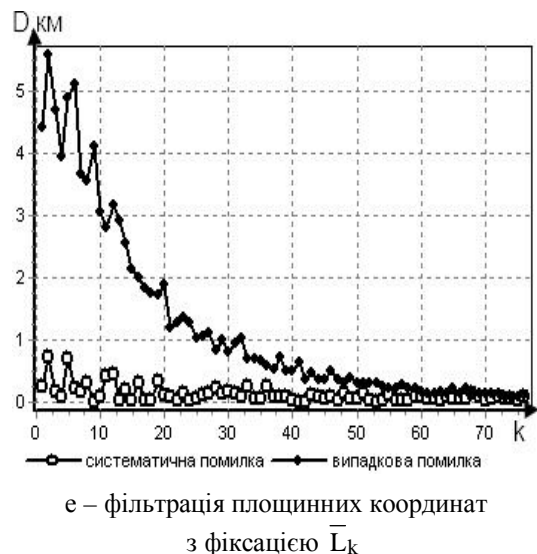
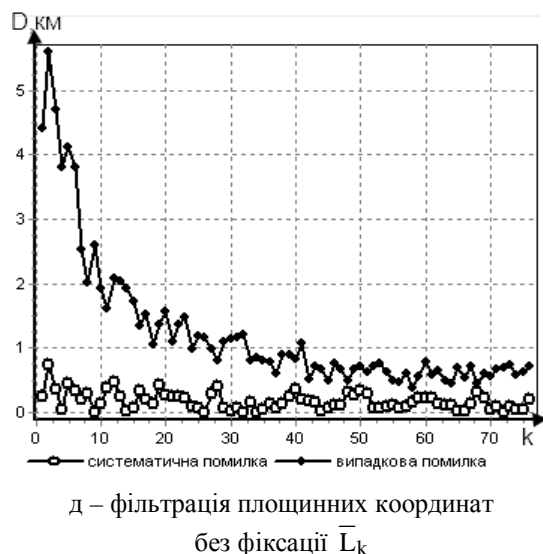
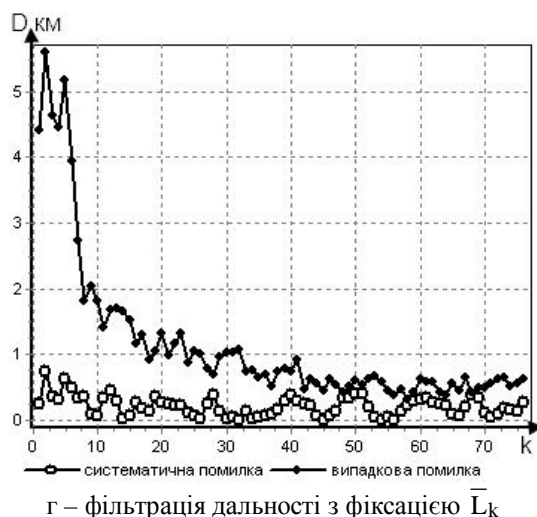
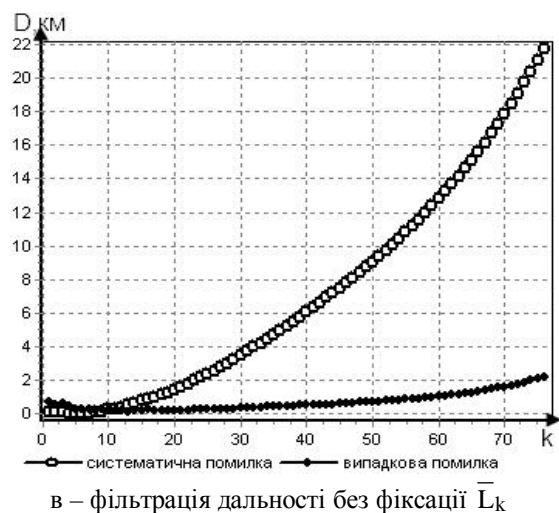
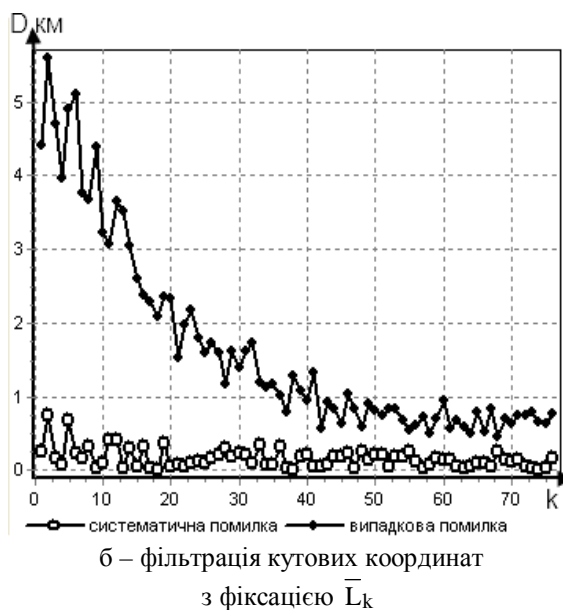
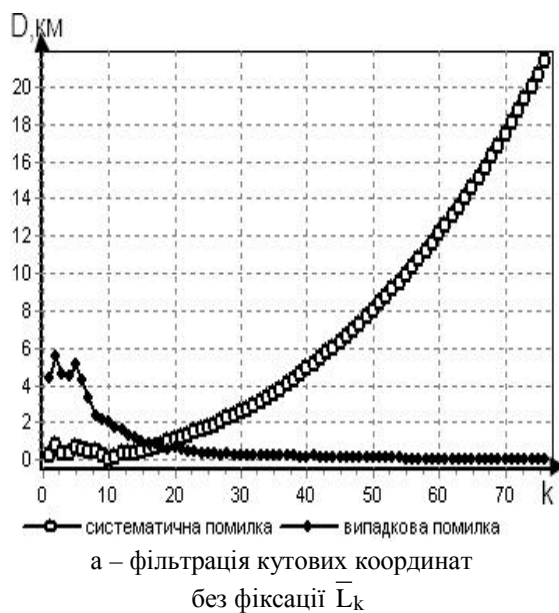


Рис. 3. Помилки визначення дальності до ПАЗ при різних варіантах фільтрації

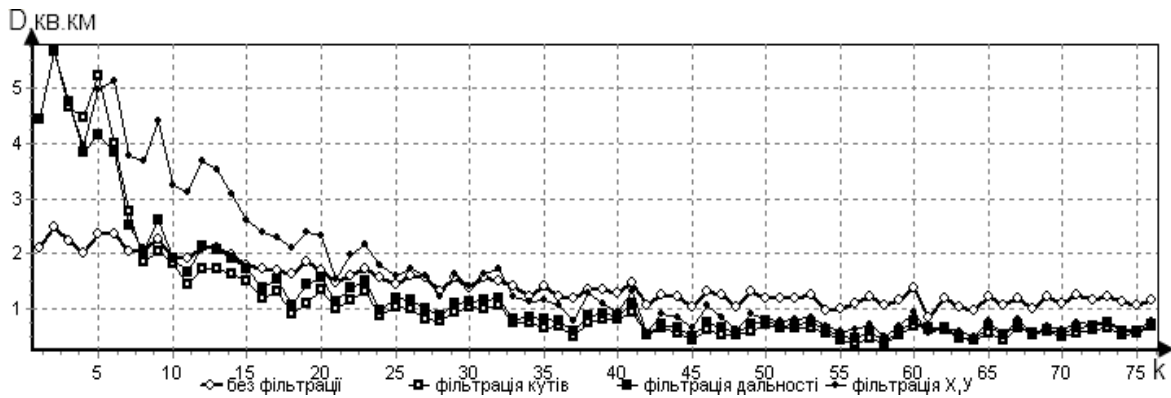


Рис. 4. Помилки визначення дальності до ПАЗ

Оцінки систематичної та випадкової помилок для варіанту, коли фільтруються кутові вимірювання (пеленги), зображені на рис. 3 а. Як видно з залежностей невідповідність реальної моделі зміни кутових координат лінійній, призводить до постійного збільшення систематичної помилки. Величина систематичної помилки (десятки кілометрів) вимагає коректування алгоритму фільтрації за рахунок фіксації елементів матриці \bar{L}_k (рис. 3, б).

Оцінки помилок для варіанту коли фільтруються вимірювання дальності до ПАЗ зображені на рис. 3, б,в. Оскільки дальність в триангуляційній системі визначається нерівноточно, випадкова помилка спочатку зменшується, потім досягає усталеного значення і знову починає збільшуватися рис. 3, б.

Оцінки систематичної та випадкової помилок для варіанту, коли фільтруються площинні координати ПАЗ, зображені на рис. 3, д,е. Оскільки модель зміни площинних координат відповідає лінійній моделі, значення помилок визначення дальності постійно зменшуються.

На рис. 4 показана порівняльна характеристика загальної помилки визначення дальності для розглянутих алгоритмів фільтрації при фіксації матриці \bar{L}_k на п'ятому кроці. Рациональним є алгоритм, який в процесі супроводження видає оцінки з міні-

мальною загальною помилкою. В даному випадку це алгоритм супроводження кутових вимірювань.

Висновки

З отриманих графіків оцінки помилок визначення координат ПАЗ видно, що використання варіанту супроводження постановника активних завад з фільтрацією площинних координат є найдоцільнішим для використання в триангуляційній системі. А використання інших варіантів супроводження можливе лише за умови фіксації елементів кореляційної матриці помилок.

Список літератури

1. Ширман Я.Д. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Малярченко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: пер. с англ. / Э. Сейдж, Дж. Мелс – М.: Связь, 1976. – 496 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВІЦ, 2000, – 428 с.

Надійшла до редколегії 1.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АЛГОРИТМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПОСТАНОВЩИКА АКТИВНЫХ ПОМЕХ И ИХ АНАЛИЗ

Х.А. Турсунходжаев, О.Ю. Лавров

Рассматриваются алгоритмы фильтрации для сопровождения постановщика активных помех в триангуляционной системе локации. Осуществляется их сравнительный анализ, для чего математически моделируется триангуляционная система, процесс измерения пеленгатором угловых координат и работа устройства фильтрации на различных этапах обработки радиолокационной информации. Получено, количественные оценки ошибок определения координат постановщика активных помех.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, триангуляционный метод, показатели качества.

ALGORITHMS OF SUPPORT OF DIRECTORS OF ACTIVE HINDRANCES AND THEIR ANALYSIS

K.A. Tursunhodzhaev, O.Y. Lavrov

The equation methods of aims' angular coordinates in the triangulation system of location are examined. Performed a comparative analysis for which mathematically simulated triangulation system, process measurement of the angular coordinates and work of filtration devices at different stages of processing radar data. Obtained, quantitative estimates of errors in the determination coordinates director active interference.

Keywords: passive radiolocation, triangulation, quality index.