

## АНАЛИЗ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОШИБОК ТРАЕКТОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПО ДАННЫМ ДВУХКООРДИНАТНОЙ РЛС

Неуймин А. С., к.т.н.; Євтух В. М.; Жук С. Я., д.т.н., профессор  
 Национальный технический университет Украины  
 «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

При решении задач вторичной обработки радиолокационной информации применяются модели движения цели и измерения в полярной и прямоугольной системах координат (СК) [1]. Однако при использовании двухкоординатных РЛС, в которых измеряются дальность  $r$  и азимут  $\beta$ , такие модели не позволяют адекватно описать траекторию цели на малых дальностях, что приводит к срыву сопровождения целей. Поэтому представляет интерес анализ точностных характеристик траекторной фильтрации по данным двухкоординатной РЛС на малых дальностях.

Дискретная модель движения цели и уравнение измерения РЛС в полярной СК имеют вид [1]

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{G}_k \boldsymbol{\omega}_k, \quad (1) \quad \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_k = (r_k, \dot{r}_k, \beta_k, \dot{\beta}_k)^T$  — вектор состояния, компонентами которого являются параметры движения цели в момент времени  $k$ ,  $\mathbf{z}_k = (r_k^m, \beta_k^m)^T$  — вектор измерения;  $\mathbf{v}_k$  — вектор ошибок измерения с корреляционной матрицей  $\mathbf{R}_k = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\beta^2)$ . Для описания движения цели по каждой координате используется стохастическая модель второго порядка.

Траекторная фильтрация на основе модели (1), (2) выполняется независимо по координатам дальности и азимута линейными дискретными фильтрами Калмана второго порядка [1]. Анализ алгоритма выполнен методом Монте-Карло. Моделировалось прямолинейное равномерное движение цели в декартовой СК с начальным положением  $(-5\text{км}, 95\text{км}, 10\text{км})$  и скоростью  $V = (0\text{км/с}, 0.33\text{км/с}, 0\text{км/с})$ . РЛС располагалась в начале СК. На рис.1 показана истинная траектория цели в полярной СК, которая на малых дальностях отличается от прямой. Это обусловлено отличием азимута цели в горизонтальной плоскости от азимута цели в наклонной плоскости, в которой измеряется дальность.

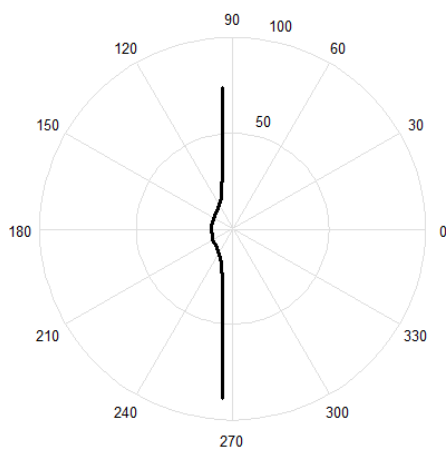


Рисунок 1

СКО ускорения по дальности в уравнении (1) полагалось  $\sigma_m = 5\text{м/с}^2$ .

Ошибки измерения  $\sigma_r=800\text{м}$ ,  $\sigma_\beta=1^\circ$ , период обзора  $T=10\text{с}$ . Испытания проводились по ста реализациям. На рис.2 а,б показаны математические ожидания  $m_r^*, m_\beta^*$  (кривые 1) и СКО ошибки прогноза положения цели  $\sigma_r^*, \sigma_\beta^*$  (кривые 2) полученные методом Монте-Карло, а также рассчитанные фильтром  $\sqrt{p_r^*}, \sqrt{p_\beta^*}$  (кривые 3) СКО этих ошибок. При дальностях до цели, начиная с 30 км, в ошибке прогноза параметров возникает и резко нарастает смещение. Оно обусловлено несоответствием принятой линейной модели движения слабоманеврирующей цели ее истинному движению в полярной СК.

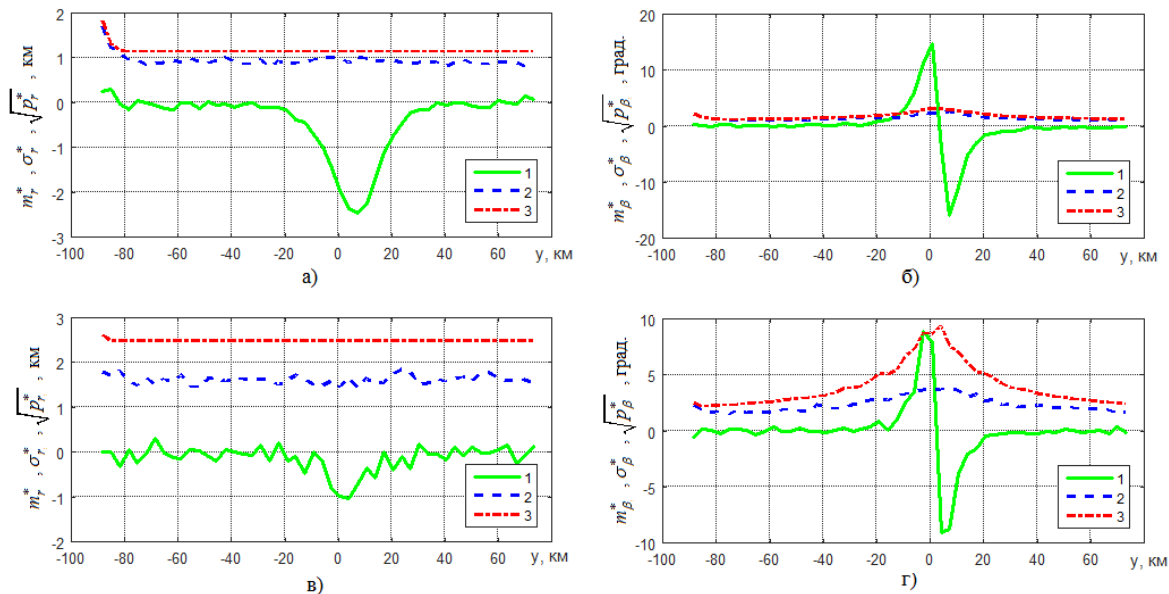


Рисунок 2

На рис. 2 в, г показаны аналогичные зависимости при  $\sigma_m = 25\text{м/с}^2$ . При увеличении СКО ускорения цели в модели СКО ошибки прогноза увеличиваются, а систематическая составляющая ошибки уменьшается.

При траекторной фильтрации в прямоугольной СК, модель движения цели также описывается уравнением (1), в которой  $\mathbf{u}_k = (x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k)^T$ . Уравнения измерения РЛС в прямоугольной СК являются нелинейными и имеют вид

$$x_k^{\text{и}} = r_k^{\text{и}} \cos(\beta_k^{\text{и}}), \quad y_k^{\text{и}} = r_k^{\text{и}} \sin(\beta_k^{\text{и}}). \quad (3)$$

Алгоритм траекторной фильтрации в прямоугольной СК на основе модели (1), (2) является расширенным дискретным фильтром Калмана четвертого порядка [1], получаемым путем линеаризации уравнений (3).

На рис. 3 а,б показаны математические ожидания  $m_x^*, m_y^*$  (кривые 1) и СКО ошибки прогноза положения цели  $\sigma_x^*, \sigma_y^*$  (кривые 2) полученные методом Монте-Карло, а также рассчитанные фильтром  $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$

(кривые 3) СКО ее ошибок, а на рис. 3 в,г приведены аналогичные характеристики при  $\sigma_m = 5\text{м/с}^2$  и  $\sigma_m = 25\text{м/с}^2$  соответственно. Увеличение СКО ускорения цели  $\sigma_m$  не влияет на величину смещения, так как оно возникает в ошибке измерения и обусловлено отличием азимута цели в горизонтальной плоскости от азимута цели в наклонной плоскости.

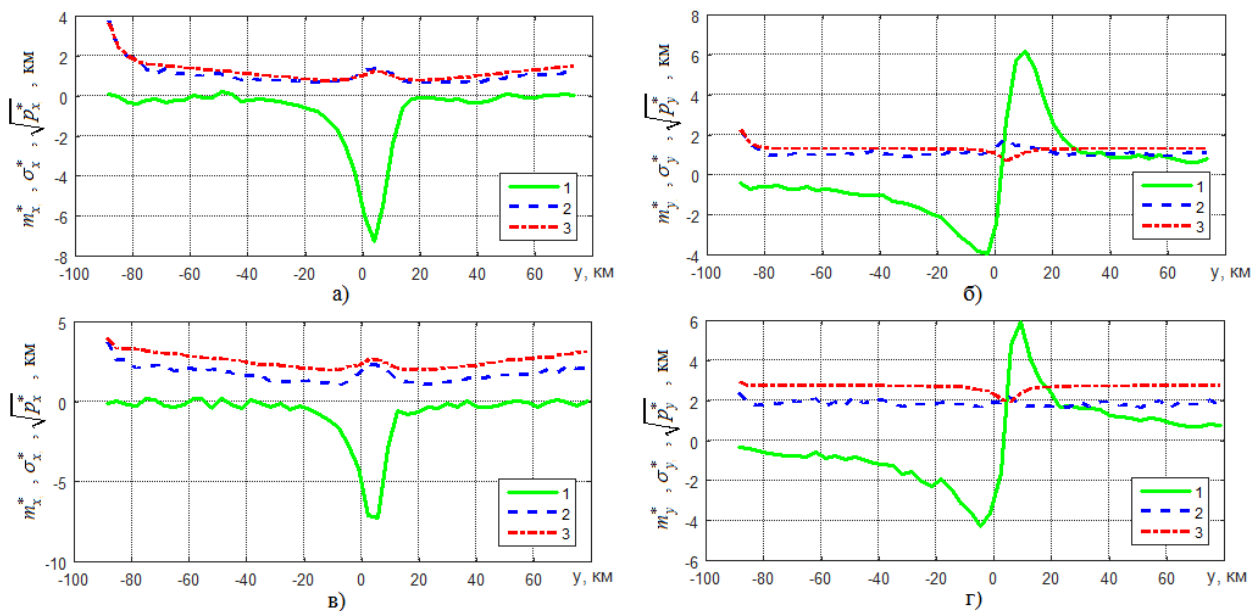


Рисунок 3

Преимуществом прямоугольной СК является отсутствие скачков в определении азимута при переходе через ось X, что позволяет упростить задачу сопровождения при многоцелевой обстановке. Однако сохраняется систематическая составляющая, для устранения которой необходимо переходить к измерению трех координат цели.

### Перечень источников

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. — Киев: КВиЦ, 2000. — 428 с. — ISBN: 966-7192-20-2.

### Анотація

Проведено аналіз точностних характеристик алгоритмів траєкторної фільтрації в прямокутній та полярній системах координат за даними двукоординатної РЛС.

**Ключові слова:** траєкторна фільтрація, система координат, помилки прогнозу.

### Аннотация

Проведен анализ точностных характеристик алгоритмов траекторной фильтрации в прямоугольной и полярной системе координат по данным двухкоординатной РЛС.

**Ключевые слова:** траекторная фильтрация, система координат, ошибки прогноза.

### Abstract

The accuracy characteristics analysis of the trajectory filtering algorithms in rectangular and polar coordinates due to two-coordinate radar is performed.

**Keywords:** trajectory filtering, coordinate system, prediction errors.