

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батурицкий

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

## МЕТОДЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ОБЗОРНЫХ РЛС, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРЯМОУГОЛЬНУЮ СИСТЕМУ КООРДИНАТ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Исследованы алгоритмы вторичной обработки радиолокационной информации, аналогичные реализованным в обзорной РЛС 1Л13 «НЕБО-СВ», на этапе сопровождения траектории цели в установившемся режиме. Проведен анализ качества фильтрации и экстраполяции параметров сопровождаемой траектории, при использовании имеющихся узкополосных и предлагаемых сверхширокополосных сигналов. Предложен метод сопровождения траектории цели, при интенсивном маневре, с применением сверхширокополосных сигналов и учета радиальной скорости цели. Показано уменьшение динамической и флюктуационной ошибки при использовании сверхширокополосных сигналов и учете радиальной скорости цели.

**Ключевые слова:** вторичная обработка, обзорные РЛС, сверхширокополосные сигналы, фильтрация, экстраполяция, радиальная скорость цели.

### Введение

**Постановка проблемы.** В [1, 2] результатами моделирования показано, что применение сверхширокополосных (СШП) ЛЧМ сигналов с шириной спектра  $\Delta f = 150$  МГц, которые обеспечивают разрешение элементов цели по дальности, улучшает траекторное сопровождение в обзорных РЛС 19Ж6 и 55Ж6, использующие координаты азимут-дальность. Алгоритм экстраполяции, с учетом оценок радиальной скорости цели, полученной при обработке СШП сигналов позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку экстраполяции дальности, вызванную интенсивным маневром и наличием «кажущихся» ускорений, при несущественном увеличении флюктуационной ошибки независимо от величины полного вектора скорости. Однако в алгоритме экстраполяции обзорной РЛС, которая использует прямоугольную систему координат, оценка радиальной скорости не используется и ее учет затруднителен.

**Анализ литературы.** В обзорной РЛС 1Л13 «НЕБО-СВ» координаты азимута и дальности преобразуются в прямоугольные координаты для решения задач вторичной обработки по формулам:

$$\begin{aligned} x_{ц} &= r_{ц} \cos \beta_{ц}; \\ y_{ц} &= r_{ц} \sin \beta_{ц}. \end{aligned} \quad (1)$$

Это обеспечивает реализацию модели прямолинейного и равномерного движения цели:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + V_x t; \\ y(t) &= y_0 + V_y t, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты отправной точки сопровождения ВО;  $V_x, V_y$  – скорость изменения координат  $x$  и  $y$ . Принятая модель на 80...90% соответствует реальному поведению воздушных объектов и существенно упрощает все расчеты, связанные с вторичной обработкой радиолокационной информации

(РЛИ). На участках маневра цели в процессе сопровождения всегда может вмешаться оператор и внести соответствующую корректуру [3]. В [4] предложен метод измерения радиальной скорости при обработке одной пачки СШП сигналов, отраженных от цели. Метод получения оценки радиальной скорости цели реализуется на основе того, что временная задержка ДП в пачке имеет линейную связь с радиальной скоростью цели, а использование СШП сигналов позволяет эту задержку измерять. Это позволяет расширить вектор измеряемых параметров, учесть полученные оценки радиальной скорости в алгоритме экстраполяции дальности для уменьшения динамической ошибки дальности. Далее рассматриваются возможности улучшения алгоритмов вторичной обработки РЛИ при использовании оценки радиальной скорости, полученной при обработке обнаруженной пачки СШП ЛЧМ сигналов с девиацией частоты внутри импульса  $\Delta f = 150$  МГц с алгоритмом сопровождения, реализованным в обзорной РЛС 1Л13 «НЕБО-СВ».

### Основная часть

#### 1. Алгоритм сопровождения трасс целей по данным РЛС 1Л13

Оптимальная процедура сглаживания параметров трасс при прямых измерениях и линейной модели движения цели может быть описана следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \hat{x}_n^y + \alpha_n (\tilde{x}_n - \hat{x}_n^y); \\ \hat{y}_n &= \hat{y}_n^y + \alpha_n (\tilde{y}_n - \hat{y}_n^y); \\ \hat{v}_{xn} &= \hat{v}_{xn-1} + \beta_n (\tilde{v}_{xn} - \hat{v}_{xn-1}); \\ \hat{v}_{yn} &= \hat{v}_{yn-1} + \beta_n (\tilde{v}_{yn} - \hat{v}_{yn-1}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{v}_{xn}, \hat{v}_{yn}$  – сглаженные значения координат и составляющих скорости на n-м шаге;

$\check{x}_n, \check{y}_n$  – экстраполированные значения координат на n-й шаг;

$\tilde{x}_n, \tilde{y}_n$  – текущие измерения координат на n-м шаге;

$\tilde{v}_{xn}, \tilde{v}_{yn}$  – значения составляющих скорости, определяемые по текущим измерениям координат;

$\alpha_n, \beta_n$  – коэффициенты сглаживания на n-м шаге.

В РЛС 1Л13 вместо оптимальной процедуры сглаживания выбрана упрощенная процедура, соответствующая оптимальной на третьем шаге, т.е. при  $n = 3$ . При этом  $\alpha=5/6$ , а  $\beta=1/2$ , а формулы сглаживания и экстраполяции координат принимают вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \frac{1}{6}(5\check{x}_n + 2\tilde{x}_{n-1} - \tilde{x}_{n-2}); \\ \hat{y}_n &= \frac{1}{6}(5\check{y}_n + 2\tilde{y}_{n-1} - \tilde{y}_{n-2}); \\ \hat{v}_{xn} &= \frac{1}{2T_0}(\check{x}_n - \tilde{x}_{n-2}); \\ \hat{v}_{yn} &= \frac{1}{2T_0}(\check{y}_n - \tilde{y}_{n-2}); \\ \check{x}_{n+1} &= \frac{1}{3}(4\hat{x}_n + \tilde{x}_{n-1} - 2\tilde{x}_{n-2}); \\ \check{y}_{n+1} &= \frac{1}{3}(4\hat{y}_n + \tilde{y}_{n-1} - 2\tilde{y}_{n-2}). \end{aligned} \quad (4)$$

Замена оптимальной процедуры сглаживания на квазиоптимальную позволила существенно упростить расчеты и сделать сопровождение воздушных объектов нечувствительным к слабым случайным маневрам [3].

## 2. Алгоритм экстраполяции прямоугольных координат цели с учетом оценки радиальной скорости, полученной при обработке обнаруженной пачки СШП сигналов

Значение путевой скорости можно получить по двум оценкам дальности и двум оценкам азимута на двух оборотах антенны (рис. 1), применив теорему косинусов:

$$V^2 = (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\Delta\beta)) / T_0^2, \quad (4)$$

где  $T_0$  – период обзора РЛС;  $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ .

Для преобразования выражения (4) необходимо прибавить и вычесть удвоенное произведение оценок дальностей на двух оборотах антенны  $2r_1r_2$ :

$$\begin{aligned} V^2 &= (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\Delta\beta) + \\ &+ 2r_1r_2 - 2r_1r_2) / T_0^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуем выражение (5) к виду:

$$V^2 = ((r_2 - r_1)^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos(\Delta\beta))) / T_0^2, \quad (6)$$

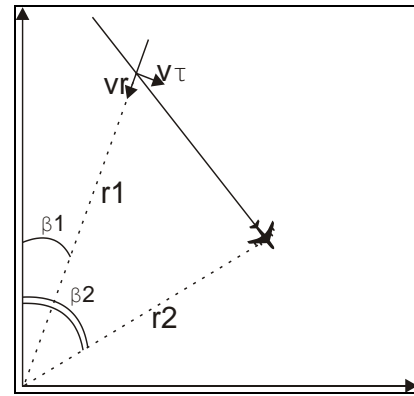


Рис. 1. Горизонтальная проекция движения цели в полярных координатах

где  $(r_2 - r_1) / T_0 = V_r$  – радиальная скорость цели за один оборот антенны;

$\sqrt{2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos(\Delta\beta))} / T_0 = V_\tau$  – тангенциальная скорость цели за один оборот антенны.

Величина  $V_\tau = \sqrt{2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos(\Delta\beta))} / T_0$  положительная при любых значениях функции. Предлагается учитывать знак по результату:

$$\text{sgn}(\Delta\beta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \Delta\beta \geq 0; \\ -1 & \text{при } \Delta\beta < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Величины радиальной и тангенциальной скорости можно рассчитать иначе:

$$V_r = V \cos q; \quad V_\tau = V \sin q, \quad (8)$$

где  $q$  – ракурс цели.

В алгоритмах вторичной обработки РЛИ скорость изменения координат  $V_x, V_y$  получают как:

$$V_x = (x_2 - x_1) / T_0; \quad V_y = (y_2 - y_1) / T_0, \quad (9)$$

где  $x_1, x_2, y_1, y_2$  – прямоугольные координаты, рассчитанные по измеренным значениям полярных координат за два оборота антенны.

Приведем выражения скорости  $V_x$  и  $V_y$  к виду, при котором учитывается радиальная и тангенциальная составляющая скорости:

$$\begin{aligned} V_x &= V \sin(\theta) = V \sin(q + \beta) = \\ &= V(\sin q \cos \beta + \sin \beta \cos q) = \\ &= V \left( \frac{V_\tau}{V} \cos \beta - \frac{V_r}{V} \sin \beta \right) = V_r \sin \beta + V_\tau \cos \beta; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_y &= V \cos(\theta) = V \cos(q + \beta) = \\ &= V(\cos q \cos \beta - \sin q \sin \beta) = \\ &= V \left( \frac{V_r}{V} \cos \beta - \frac{V_\tau}{V} \sin \beta \right) = V_r \cos \beta - V_\tau \sin \beta, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\theta$  – курс цели.

Окончательные выражения расчета скоростей изменения прямоугольных координат, которые учитывают радиальную скорость цели, принимают вид:

$$V_x = \tilde{V}_r \sin \beta - \cos \beta \sqrt{2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos \Delta\beta)},$$

$$V_y = \tilde{V}_r \cos \beta + \sin \beta \sqrt{2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (1 - \cos \Delta\beta)}, \quad (12)$$

где  $\tilde{V}_r$  – оценка радиальной скорости цели, полученная при обработке обнаруженной пачки СШП сигналов. Тогда прямоугольные координаты экстраполируются с учетом (12):

$$x_{Vr\tilde{y}} = x_n + VxT_0; \quad y_{Vr\tilde{y}} = y_n + VyT_0. \quad (13)$$

Моделирование показало, что на участке равномерного прямолинейного полета цели дисперсия оценок радиальной скорости и при использовании СШП сигналов значительно больше, чем при использовании выражений (9). Поэтому на прямолинейном участке следует производить экстраполяцию прямоугольных координат известным методом, а при маневре цели – с учетом скоростей, описанных соотношениями (12). Переключение каналов фильтров следует производить по результату сравнения ошибок экстраполяции дальностей.

$$(r_n - \dot{r}_y)^2 \leq (r_n - r_y^{Vr})^2$$

$$\dot{r}_y = \sqrt{x_y^2 + y_y^2}; \quad r_y^{Vr} = \sqrt{x_{Vr\tilde{y}}^2 + y_{Vr\tilde{y}}^2}. \quad (14)$$

Работа алгоритмов следящих измерений параметров трасс целей, с использованием алгоритма РЛС 1Л13 для существующих узкополосных и предлагаемых СШП сигналов, проверялась методом математического моделирования с использованием программного пакета по моделированию электродинамики вторичного излучения BSS (Back Scattering Simulation) [5].

Моделирование проводилось для различных траекторий полета (рис. 2), учетом ракурсов целей,

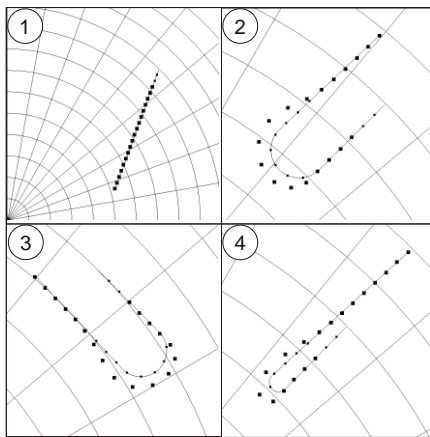


Рис.2. Горизонтальные проекции траекторий движения моделируемой цели, и точки оценок и точки экстраполяции координат при использовании узкополосного сигнала (цена деления сетки 10км·10°)

отношений сигнал-шум, при сопровождении типов целей различной протяженности: стратегического бомбардировщика В-52, тактического истребителя F-15 и крылатой ракеты ALCM.

Для оценки флюктуационной ошибки использовалась модель цели, которая движется прямолинейно, равномерно (траектория №1 рис. 2). На рис. 3

представлены полученные зависимости СКО ошибок экстраполяции дальности и азимута от номера измерения с использованием узкополосного сигнала и СШП сигнала, при отношении сигнал-шум 30дБ. Анализ полученных зависимостей показывает значительное снижение флюктуационной ошибки дальности для всех типов целей.

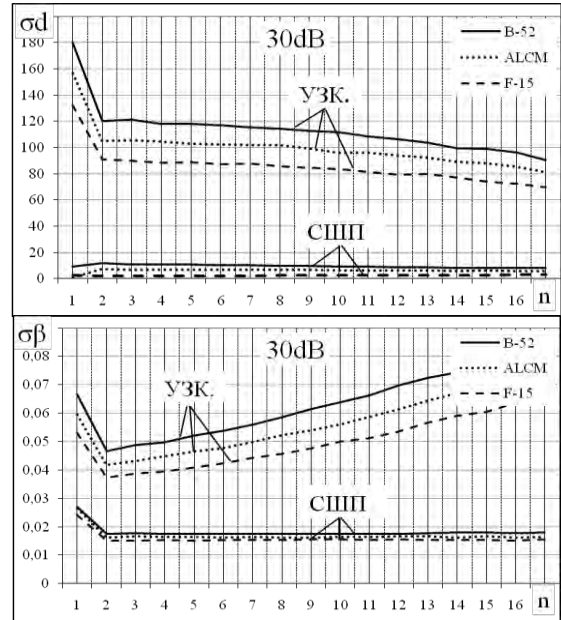


Рис. 3. Зависимости СКО ошибок экстраполяции дальности и азимута от номера измерения и типа цели

Зависимости СКО ошибки экстраполяции дальности и азимута от номера измерения и отношения сигнал-шум для тактического истребителя F-15 представлены на рис. 4.

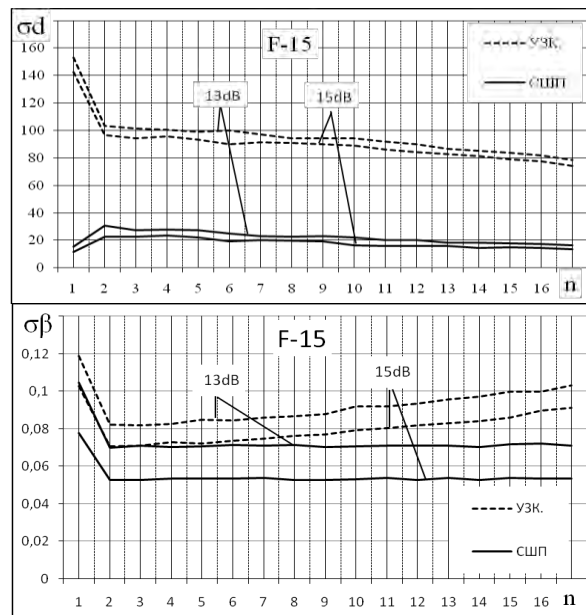


Рис. 4. Зависимости СКО ошибки экстраполяции дальности и азимута от номера измерения и отношения сигнал-шум, для тактического истребителя F-15

Анализ полученных результатов моделирования показал, что при отношениях сигнал-шум больших 13-14 дБ, СШП сигналы имеют преимущество перед узкополосными сигналами по показателю СКО флюктуационной ошибки экстраполяции азимута для всех типов целей.

При отношениях сигнал-шум менее 13дБ угловые ошибки с применением СШП сигналов заметно возрастают.

### 3. Анализ динамической ошибки экстраполяции дальности с использованием имеющегося узкополосного и предлагаемого СШП сигналов

Моделировалась работа алгоритмов траекторного сопровождения реализованного в РЛС 1Л13 и предложенного алгоритма, с учетом оценок радиальной скорости, которые получены при обработке обнаруженных пачек СШП сигнала. Зависимость динамической ошибки экстраполяции дальности от номера измерения, а так же соответствующие горизонтальные проекции траекторий движения моделируемой цели, математические ожидания точек оценок измерения прямоугольных координат и точек экстраполяции для алгоритмов траекторного сопровождения, реализованного в РЛС 1Л13, и предложенного алгоритма для различных условий представлены на рис. 5 – 7.

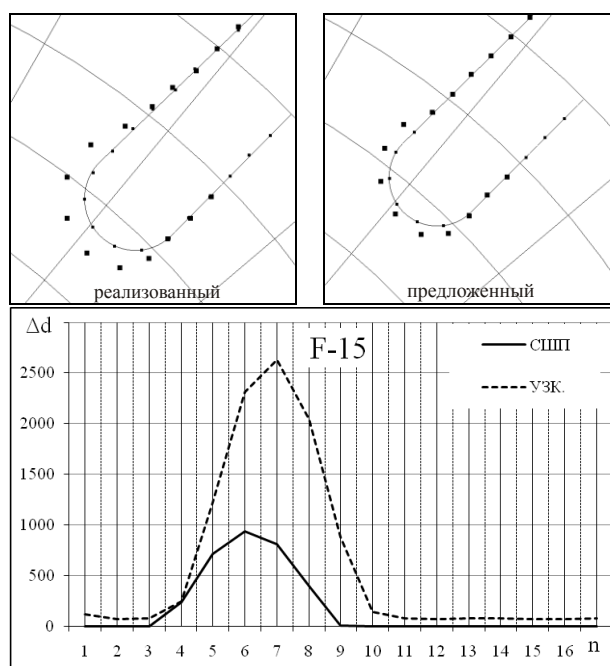


Рис. 5. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости на встречном ракурсе с нормальной перегрузкой 2

Применение выражений (12) расчета скоростей изменения прямоугольных координат с учетом оценок радиальной скорости, полученных при обработ-

ке обнаруженных пачек СШП сигналов, более точно описывают кинематическое уравнение состояния модели траектории цели, чем значения скоростей изменения прямоугольных координат, рассчитанных по оценкам измеренных полярных координат на двух оборотах РЛС.

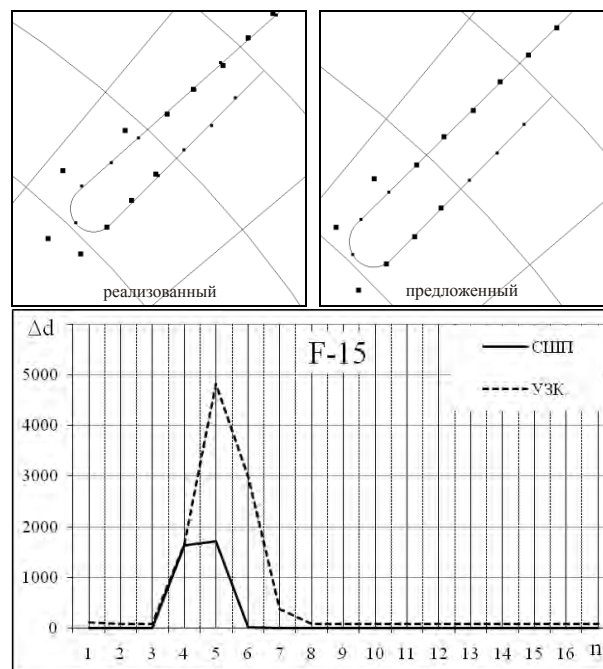


Рис. 6. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости на встречном ракурсе с перегрузкой 5

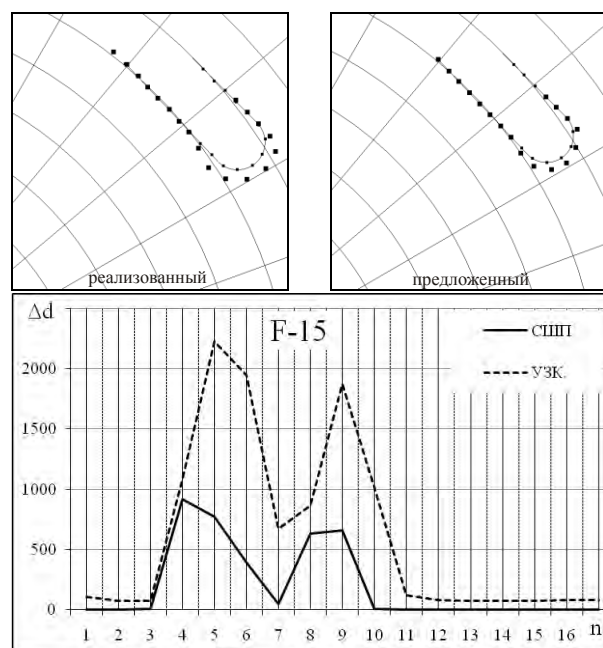


Рис. 7. Зависимость динамической ошибки экстраполяции оценки дальности от номера измерения с учетом и без учета оценок радиальной скорости на боковом ракурсе с перегрузкой 2

Анализ полученных результатов моделирования показал, что применение предложенного алгоритма приводит к значительному уменьшению динамической ошибки дальности, как на встречном, так и на боковом ракурсе цели.

## Выводы

1. Применение СШП сигналов с использованием алгоритмов вторичной обработки в РЛС 1Л13 (НЕБО-СВ) и отношении сигнал-шум больших 13-15дБ приводит к значительному снижению флюктуационных ошибок оценок дальности и азимута для всех типов целей.

2. Применение соотношений для алгоритма экстраполяции прямоугольных координат с учетом оценок радиальной скорости цели полученной при обработке СШП сигналов позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку экстраполяции дальности, вызванную интенсивным маневром, при несущественном увеличении флюктуационной ошибки независимо от величины полного вектора скорости.

## Список литературы

1. Лещенко С.П. Возможности широкополосных РЛС по измерению координат и сопровождению воздушных целей / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 1 (39). – С. 90-92.
2. Ковтунов А.Л. Методи вимірювання координат повітряних цілей в оглядових РЛС з використанням надширококуосмугових радіолокаційних сигналів / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, Д.Ю. Свистунов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 7(105). – С. 91-94.

3. Климченко В.И. Вооружение радиотехнических подразделений и частей войск ПВО СВ. Радиолокационная станция 1Л13: Уч. пособие / В.И. Климченко. – Х.: ХВУ, 2000. – 60 с.

4. Ковтунов А.Л. Методи виявлення ширококуосмугових сигналів та виміру радіальної швидкості цілі в оглядових РЛС / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 4(33). – С. 78-81.

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

6. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking / Ya.D. Shirman (ed.), S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Yu. Sedyshev, O.I. Sukharevsky. – Norwood, MA: Artech House, 2002.

7. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.

8. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 351 с.

9. Орленко В.М. Особенности обнаружения радиолокационных целей при широкой полосе частот зондирующих сигналов / В.М. Орленко // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АНПРЭ, 2006. – № 4. – С. 528-535.

10. Виявлення повітряних цілей радіолокаторами з ширококуосмуговими зондуючими сигналами // Зб. наукових праць ЦНДІ ЗСУ. – 2001. – Вип. 10. – С. 93-102.

Поступила в редколлегию 16.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.

## МЕТОДИ ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ОГЛЯДОВИХ РЛС, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПРЯМОКУТНУ СИСТЕМУ КООРДИНАТ З ВИКОРИСТАННЯМ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закіров, М.П. Батуринський

Досліджено алгоритми вторинної обробки радіолокаційної інформації аналогічні реалізованим в оглядовій РЛС 1Л13 «НЕБО-СВ», на етапі супроводу траєкторії цілі в сталому режимі. Проведено аналіз якості фільтрації й екстраполяції параметрів супроводжуваної траєкторії, при використанні наявних вузькокуосмугових та запропонованих надширококуосмугових сигналів. Запропоновано метод супроводу траєкторії цілі, при інтенсивному маневрі, із застосуванням надширококуосмугових сигналів і врахуванням радіальної швидкості цілі. Показано зменшення динамічної й флюктуаційної помилки при використанні надширококуосмугових сигналів і врахуванням радіальної швидкості цілі.

**Ключові слова:** вторинна обробка, оглядові РЛС, надширококуосмугові сигнали, фільтрація, екстраполяція, радіальна швидкість цілі.

## METHODS OF RADAR DATA REPROCESSING IN SURVEILLANCE RADARS WITH RECTANGULAR COORDINATE SYSTEM USING UWB SIGNALS

A.L. Kovtunov, S.P. Leshchenko, Z.Z. Zakirov, M.P. Baturinskiy

The algorithms of radar data reprocessing in surveillance radar 1L13 "NEBO-SV" during the target trajectory tracking in the steady state are studied. The analysis of filtration and extrapolation quality of tracked trajectory parameters using the given narrowband and proposed ultrawideband signals is performed. The method of target trajectory tracking with intense maneuver using UWB signals and taking into account the radial target velocity is proposed. Decrease of dynamic and fluctuation error while using UWB signals and taking into account the radial target velocity is shown.

**Keywords:** reprocessing, surveillance radars, UWB signals, filtration, extrapolation, radial target velocity.